

Características de secado de nopal (*Opuntia ficus-indica*) por lecho fluidizado

Gerardo Martínez Soto*, Adrián Flores Ortega*, Juan Mercado Flores*, Melva López Orozco*

RESUMEN

Se investigó el efecto del escaldado y la temperatura del aire de secado en trozos de nopal. El experimento se realizó en un secador de lecho fluidizado a cuatro temperaturas diferentes (50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C). Las curvas de secado se obtuvieron al graficar la razón de humedad adimensional (MR) contra el tiempo de secado; su comportamiento se modeló utilizando los modelos de Henderson-Pabis, Potencia, Peleg y Page. Los resultados mostraron que el secado se llevó a cabo principalmente en el periodo de velocidad decreciente. Los valores de la difusividad efectiva (D_{ef}) variaron de 0.818×10^{-7} a $3.25 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, dependiendo de las condiciones de secado. Los valores de la energía de activación (E_a) fueron de 35.85 kJ/mol para el nopal sin escaldar y 28.21 kJ/mol para el nopal escaldado, respectivamente. Se encontró que los modelos de Peleg y Page fueron los más adecuados para describir el comportamiento del secado de nopal.

ABSTRACT

The effect of blanching and drying air temperature on nopal pieces was investigated. Their drying behavior in a fluidized bed was studied at four different temperatures (50 °C, 60 °C, 70 °C and 80 °C). Drying curves were constructed using dimensionless moisture ratio (MR) and time; and their behavior was modeled using Henderson-Pabis, Power, Peleg and Page models. The results indicated that drying took place mainly when the period of drying rate decreased. The moisture effective diffusivity (D_{ef}) values varied from 0.818×10^{-7} to $3.25 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ depending on drying conditions. The activation energy (E_a) values were: 35.85 kJ/mol for the nopal without blanching and 28.21 kJ/mol for the blanching nopal respectively. Peleg and Page's models were found the most suitable for describing the drying behavior of nopal.

Recibido: 25 de mayo de 2010
Aceptado: 4 de noviembre de 2010

INTRODUCCIÓN

El nopal pertenece a la familia de las Cactáceas del género *Opuntia*. Este género es endémico de América y actualmente se han reconocido 377 especies, 104 crecen en México en forma silvestre; 60 de las cuales son endémicas de nuestro País (Anaya-Pérez, 2001). El nopal es una de las plantas más importantes que se cultiva en zonas áridas y semiáridas en todo el mundo (Han y Felker, 1997). Se consideró como una fuente de alimento para los nativos de América durante miles de años. La parte del cactus que se consume como un vegetal son las pencas tiernas conocidas como cladodios, "nopalito" o nopal-verdura los cuales generalmente se obtienen a partir de *Opuntia ficus-indica* y *O. robusta* (Sáenz-Hernández *et al.*, 2002). Tradicionalmente los nopalitos se han consumidos frescos en la dieta de los mexicanos por muchos años; y son los ingredientes principales de una gran diversidad de platillos tales como: salsas, ensaladas, sopas, botanas, bebidas y postres (Sáenz, 2000). Los nopalitos son ricos en pectina, mucilago y minerales. Se caracterizan por tener un elevado contenido de ácido málico. Dependiendo de la variedad, son ricos en azúcares, provitamina A y vitamina C, pero pobres en nitrógeno (Houérou, 1996); además son fuente importante de fibra dietética. El mucilago es un polisacárido de alto peso molecular que se comporta como un polielectrolito y contiene diferentes azúcares como residuos de arabinosa, galactosa, ácido galacturónico,

Palabras clave:
nopal; escaldado; velocidad de secado; modelación matemática; secador de lecho fluidizado.
Keywords:
nopal; blanching; drying rate; mathematical modeling; fluidized bed drying.

* Departamento de Alimentos, División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Gto., México. C. P. 36500, tel: (462) 6242484 y 6245215 ext: 109, Fax: (462) 6242484 y 6245215 Correos electrónicos: martige@dulcinea.ugto.mx, floresoa@dulcinea.ugto.mx.

ramnosa y xilosa en diferentes proporciones; además es un complejo de sustancias poliméricas naturales de gran estructura (Matsuhira *et al.*, 2006).

En la medicina popular mexicana se ha considerado que algunas enfermedades tales como diabetes mellitus, niveles elevados de glucosa en la sangre, obesidad y desórdenes gastrointestinales, se pueden controlar al consumir nopales (Corrales-García *et al.*, 2004). Estudios recientes han demostrado que la ingestión de algunas especies de nopal pueden disminuir los niveles de glucosa y lípidos en la sangre debido a su elevado contenido de fibra: 100 g de nopales crudos proporcionan 3.5 g de fibra dietética (Cárdenas-Medellín *et al.*, 1998; Díaz-Romero *et al.*, 2004; Wolfram *et al.*, 2002). Por lo anterior, el nopal se puede considerar como un alimento funcional.

El secado es la técnica comercial más comúnmente empleada en la industria de procesamiento de alimentos. Involucra la evaporación de la humedad dentro del producto mediante la aplicación de calor y su subsecuente remoción del producto (Ekechukwu, 1999). Este proceso de deshidratación involucra la transferencia simultánea de calor y masa.

La deshidratación es una técnica de conservación de alimentos en la cual el contenido de humedad se reduce hasta un nivel en el cual el producto es relativamente estable químicamente. El escaldado es una operación preliminar a la deshidratación con la finalidad de inactivar enzimas ya que de otra manera se formarían colores y sabores desagradables en el producto (Mazza, 1983). La ventaja del proceso de deshidratación es principalmente retardar el deterioro químico y microbiológico de los alimentos (Doymaz y Pala, 2003). Por otro lado la deshidratación reduce el volumen, el peso e influye en los costos del empaque, almacenamiento y transporte.

Actualmente el secado con aire caliente continúa siendo el método más común de deshidratación en la industria química y de los alimentos (Krokida *et al.*, 2003). Sin embargo, las elevadas temperaturas y los periodos prolongados para remover el agua puede afectar seriamente su calidad nutricional y organoléptica. Por esta razón, la temperatura de secado es una variable crítica durante el proceso de secado (Vega *et al.*, 2007). El secado por lecho fluidizado se utiliza en el secado de materiales en forma de partículas, en este método las condiciones son adecuadas para una rápida transferencia de masa y calor. Debido a que es un método de secado rápido se ha considerado como un método de secado económico comparado con otras técnicas de secado.

Se han utilizado varios modelos matemáticos empíricos para simular el proceso de secado de frutas y vegetales, los cuales son útiles en la optimización del proceso, así como en el diseño de equipo de secado (Akpınar, 2006). Entre los que se usan están los propuestos por Newton, Peleg, Henderson-Pabis, Page (Simal *et al.*, 2005, Akpınar, 2006).

Los objetivos de este trabajo fueron determinar el efecto del escaldado y la temperatura del aire sobre la cinética de secado de nopal en un secador de lecho fluidizado y seleccionar el mejor modelo matemático que describa las curvas de secado.

MÉTODOS

El nopal verdura (*Opuntia ficus indica*) se adquirió en el mercado de abastos de la ciudad de Irapuato, Gto. Se seleccionó visualmente en base a su grado de madurez, apariencia y tamaño. Se sumergió en una solución de hipoclorito de sodio al 1 % durante 5 minutos, posteriormente se enjugaron en agua limpia y la humedad superficial se removió con toallas de papel, se cortaron en trozos de 20 mm x 20 mm x 3 mm aproximadamente. Un lote del nopal en forma de trozos se escaldó en agua a 80 °C durante 3 minutos e inmediatamente se enfriaron utilizando agua fría.

La deshidratación se realizó en un secador de lecho fluidizado (columna de acrílico de 100 mm de diámetro y 1100 mm de altura). El rango de velocidades disponibles en la columna de fluidización fue de 0 m/s a 13 m/s y el rango de temperaturas del aire de secado fue desde la temperatura ambiente hasta 100 °C. Los trozos de nopal se deshidrataron en el secador de lecho fluidizado a una temperatura del aire de secado de 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C. Durante el secado la velocidad del aire se disminuyó conforme se redujo el contenido de humedad de las muestras. El secado se suspendió hasta que se alcanzaron contenidos de humedad de 4 % a 6 % (b.h); humedad a la cual se puede considerar un producto estable para su almacenamiento. Las muestras se removieron periódicamente a intervalos de 10 minutos durante el secado para registrar la pérdida de peso. Para cada experimento se realizaron tres repeticiones.

Análisis de humedad

El contenido de humedad de las muestras se determinó por el procedimiento propuesto por Ranganna (1986). Los valores del contenido de humedad en todas las muestras se transformaron en razones de humedad adimensionales suponiendo que el contenido de humedad final es el contenido de humedad en el equilibrio.

Modelación matemáticas de las curvas de secado

La razón de humedad (MR), un contenido de humedad adimensional se puede calcular de acuerdo a:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

Donde M_o , M_t y M_e son el contenido de humedad inicial, en cualquier momento (t) y en el equilibrio respectivamente. El contenido de humedad en el equilibrio (M_e) es extremadamente pequeño comparado con el contenido de humedad inicial (M_o) y en cualquier momento (M_t), por lo que se puede omitir de la ecuación anterior (Sacilik y Elicin, 2006; Wang *et al.*, 2007).

Los modelos matemáticos que caracterizan la cinética de secado de alimentos y que se aplican en este trabajo son los siguientes:

Modelo de Henderson-Pabis

$$MR = ke^{-nt} \quad (2)$$

Modelo de la Potencia

$$MR = kt^n \quad (3)$$

Modelo de Peleg

$$M_t = M_o - \frac{t}{k + nt} \quad (4)$$

Modelo de Page

$$MR = e^{-kt^n} \quad (5)$$

Análisis estadístico

El coeficiente de correlación (R^2) se utilizó como principal criterio para seleccionar el mejor modelo con la finalidad de validar las curvas de secado (Dandamrongrak *et al.*, 2002; Panchariya *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2007). También se consideró la raíz promedio del cuadrado del error y la Chi-cuadrada reducida (χ^2) dadas por las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_E - MR_C)^2}{N}} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_E - MR_C)^2}{N - n_c} \quad (7)$$

Donde MR_E es la razón de humedad experimental, MR_C es la razón de humedad calculada, N es el número de observaciones y n_c es el número de constantes en el modelo de secado. Los mayores valores de R^2 y los valores más bajos de RMSE y χ^2 de se consideraron como criterio para el mejor ajuste de los datos experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 1 y 2 muestran las características típicas de las curvas de secado para trozos de nopal sin escaldar y escaldado, durante el proceso de secado a 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C. Se observa que al incrementar la temperatura, la velocidad de secado se incrementa significativamente y, debido a la difusión de la humedad que ocurrió durante el proceso, se reduce el tiempo de secado. En base a estos resultados el contenido de humedad final se obtuvo entre 4 % y 6 % en base húmeda con un tiempo de secado de entre 110 min y 270 min; dependiendo del pretratamiento y de la temperatura del aire de secado. Para el nopal deshidratado sin escaldar el tiempo de secado se redujo en aproximadamente 47 %, 56 % y 72 %, y para el nopal escaldado la reducción fue del 41 %, 59 % y 85 %; conforme la temperatura del aire de secado se incrementó de 50 °C a 80 °C. Esto debido principalmente a que el escaldado produce alteraciones estructurales que afectan el transporte de humedad y a que a mayor temperatura del aire se obtiene una mayor velocidad de secado. Los efectos pronunciados del escaldado y la temperatura del aire de secado sobre el tiempo de secado fue similar a los estudios previos realizados en rebanadas de ajo (Madamba *et al.*, 1996) rebanadas de achicoria (Lee *et al.*, 2004), láminas de uva (Maskan *et al.*, 2002), y cubos de zanahoria (Doymaz, 2004).

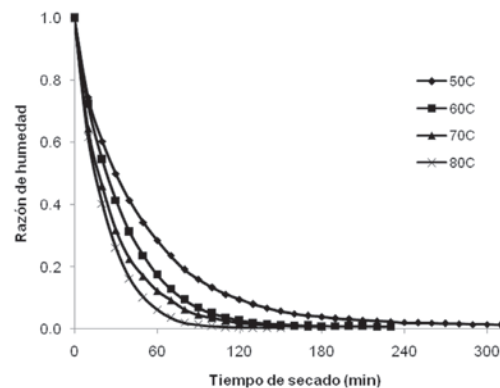


Figura 1. Curvas de secado a diferentes temperaturas para nopal deshidratado sin escaldar.

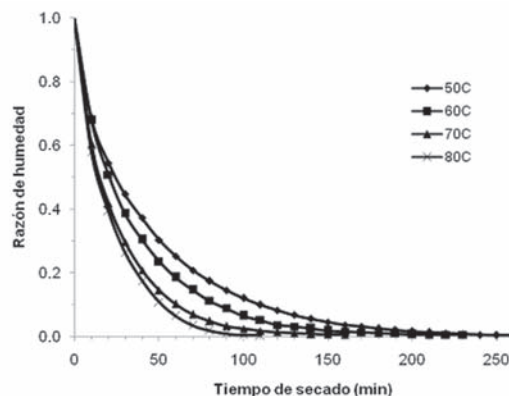


Figura 2. Curvas de secado a diferentes temperaturas para nopal escaldado.

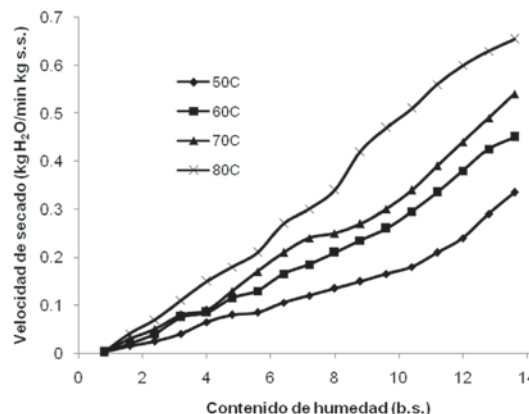


Figura 3. Curvas de velocidad de secado a diferentes temperaturas para nopal sin escaldar.

La velocidad de secado se calculó a partir de las pendientes de las curvas de contenido de humedad contra el tiempo. Las figuras 3 y 4 muestran la variación en la velocidad de secado contra el contenido de humedad a diferentes temperaturas. Se observa que la velocidad de secado inicial fue elevada y posteriormente presentó una disminución gradual conforme el producto alcanzó su contenido de humedad en el equilibrio debido a que la humedad interna requiere más tiempo para su remoción. Al aumentar la temperatura del aire de secado, la velocidad de secado se incrementó debido a la elevación de la presión de vapor del agua, desplazándose hacia arriba para cada temperatura. En este trabajo el secado de nopal se llevó a cabo principalmente en el periodo de velocidad decreciente dado que la humedad fue controlada por el mecanismo de difusión. Estos resultados están de acuerdo con trabajos previos del secado de diferentes materiales biológicos (Lee *et al.*, 2004; Maskan *et al.*, 2002; Akpınar *et al.*, 2003; Lahsasni *et al.*, 2004; Ghazanfari *et al.*, 2006; Arora *et al.*, 2006). El secado durante el periodo de velocidad decreciente está internamente controlado por el mecanismo de la difusión debido a la disminución en la humedad disponible en la superficie para la evaporación con respecto al tiempo. Los resultados de este trabajo indican que la difusión es el principal mecanismo físico que gobierna el movimiento de la humedad durante el secado de nopal, dado que experimentalmente no se presentó el periodo de velocidad constante. Se utilizó la ecuación de difusión de Fick modificada (Crank, 1975) y desarrollada para una placa semi-infinita para describir el secado de trozos de nopal (Madamba *et al.*, 1996; Maskan *et al.*, 2002 y Demirel y Turhan 2003).

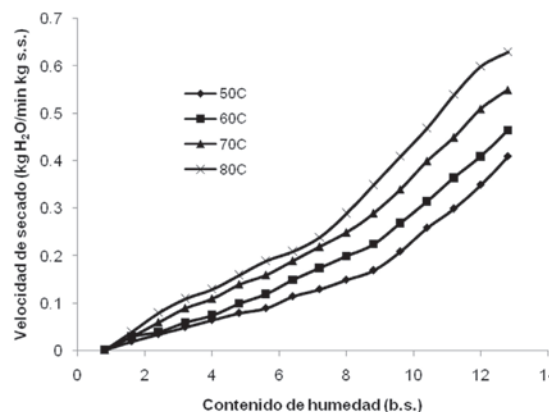


Figura 4. Curvas de velocidad de secado a diferentes temperaturas para nopal escaldado.

En la ecuación (8), L representa el espesor del trozo de nopal. Al graficar la razón de humedad (MR) y el tiempo de secado en una escala logarítmica (figuras 5 y 6) se obtiene una relación lineal a diferentes temperaturas de secado para trozos de nopal sin escaldar y escaldado. En este trabajo las líneas rectas se ajustaron satisfactoriamente a los datos experimentales con valores de $R^2 > 0.96$ para los trozos de nopal escaldado y sin escaldar y las temperaturas de secado investigadas. La difusividad efectiva (D_{ef}) se calculó con la ecuación 8 utilizando los valores de las pendientes obtenidas de la regresión lineal de $\ln(MR)$ contra el tiempo (t) para las diferentes condiciones de secado. Los valores de la D_{ef} estimada para los diferentes tratamientos se presentan en la tabla 1. El escaldado y la temperatura del aire afectan la velocidad de secado influyendo de manera significativa los valores de la D_{ef} , los cuales se presentan en el rango de 0.89×10^{-7} a $3.25 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, dependiendo de las condiciones de secado. Los mayores valores de D_{ef} se obtuvieron cuando el nopal se escaldó y

$$\ln MR = \ln \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \ln \frac{8}{\pi^2} - D_{ef} t \left(\frac{\pi}{2L} \right)^2 \quad (8)$$

con las mayores temperaturas del aire de secado, dado que a estas temperaturas se favorece la transferencia de humedad. Estos valores se pueden comparar a los reportados para el secado de paprika (Ramesh y col., 2001), secado de chile rojo (Doymas y Pala, 2003) y cubos de zanahoria (Doymas, 2004).

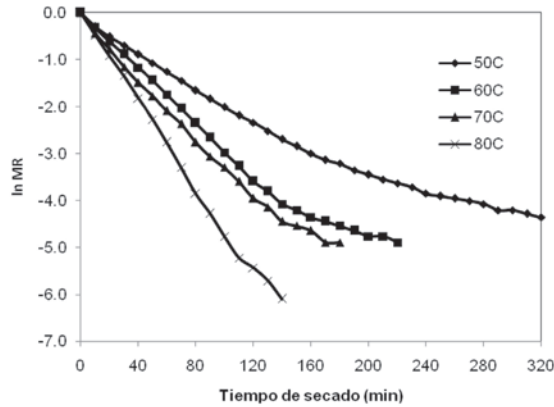


Figura 5. Gráfica semilogarítmica de las curvas de secado a diferentes temperaturas para nopal sin escaldar.

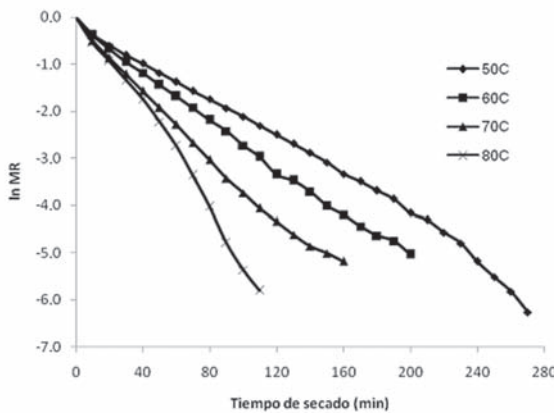


Figura 6. Gráfica semilogarítmica de las curvas de secado a diferentes temperaturas para nopal escaldado.

Tabla 1.

Valores de la difusividad efectiva para el secado de nopal sin escaldar y escaldado (los números en paréntesis corresponden al valor de R^2)

Tratamiento	Difusividad efectiva $\times 10^{-7}$ ($m^2 s^{-1}$)			
	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
S/T	0.89 (0.96)	1.42 (0.96)	1.71 (0.98)	2.74 (0.99)
Escaldado	1.29 (0.99)	1.52 (0.99)	2.01 (0.99)	3.25 (0.99)

El efecto de la temperatura sobre la difusividad efectiva se describe generalmente por la ecuación de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (9)$$

Donde D_o es una constante equivalente a la difusividad efectiva a una elevada e infinita temperatura ($m^2 s^{-1}$), E_a es la energía de activación ($kJ kg^{-1}$), R es la constante de los gases ($kJ kmol^{-1} K^{-1}$), y T es la temperatura absoluta del aire (K). La energía de activación para la difusión se calculó a partir de la pendiente de la línea recta que resulta al graficar el $\ln(D_{ef})$ contra el recíproco de la temperatura, $1/T$ (Madamba *et al.*, 1996; Maskan *et al.*, 2002; Panchariya *et al.*, 2002; Doymaz y Pala, 2003). La figura 7 presenta la relación lineal entre $\ln(D_{ef})$ y $1/T$ en el rango de las temperaturas del aire de secado para los trozos de nopal sin escaldar y escaldado. La energía de activación calculada a partir de la pendiente de las líneas rectas en la figura 7 fue de 35.85 ($R^2 = 0.98$) y 28.21 ($R^2 = 0.93$) $kJ mol^{-1}$ para las muestras de nopal sin escaldar y escaldado respectivamente. La energía de activación disminuye al someter a los trozos de nopal a un escaldado, debido a que se requiere menos energía para remover la humedad durante el secado. Los valores de la energía de activación obtenidos en este trabajo se encuentran en el rango general de 15 a 40 $kJ mol^{-1}$ para varios alimentos (Rizvi, 1986).

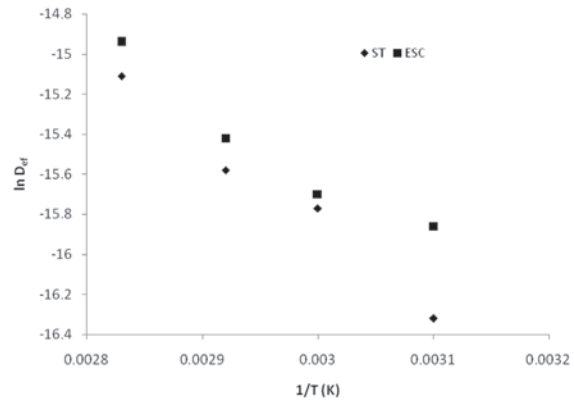


Figura 7. Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura de secado de nopal sin escaldar y escaldado.

Las tablas 2 y 3 presentan los coeficientes y constantes de secado, así como los valores de R^2 , RMSE y χ^2 para estos cuatro modelos. Los valores de R^2 , RMSE y χ^2 para las muestras de nopal sin escaldar varían en el rango de 0.9097 a 0.9984, 0.0070 a 0.8549, y 0.0055 a 0.1479 respectivamente, mientras que para el nopal escaldado estos valores fueron de 0.8082 a 0.9993, 0.0801 a 0.7315, y 0.0073 a 0.6689 respectivamente. En base a estos resultados, los modelos de Henderson-Pabis y de la Potencia son bastante aceptables pero los modelos de Peleg y Page proporcionan los mejores resultados en el ajuste de los datos experimentales de secado; lo cual permite deducir que

ambos modelos son los más adecuados. Estos resultados son similares a los reportados por Madamba y colaboradores (1996) para rebanadas de ajo, Dandamrongrak y colaboradores (2002) para plátanos con varios pretratamientos y Lahsasni y colaboradores (2004) para tuna.

Tabla 2.
Parámetros de los modelos a diferentes temperaturas de nopal deshidratado sin escaldar.

Modelo	Temperatura (°C)	k	n	R ²	RMSE	X ²
Henderson-Pabis	50	0.5559	0.0131	0.9636	0.7172	0.5499
	60	0.6060	0.0220	0.9528	0.6960	0.5530
	70	0.6604	0.0274	0.9836	0.1004	0.1479
	80	0.8373	0.0431	0.9875	0.2592	0.0784
Potencia	50	60.592	1.414	0.9288	0.6409	0.4402
	60	144.52	1.786	0.9269	0.8549	0.8041
	70	100.96	1.765	0.9209	0.5813	0.3829
	80	501.71	2.364	0.9097	0.6250	0.4557
Peleg	50	1.6595	0.0566	0.9984	0.3602	0.1384
	60	1.2506	0.0556	0.9963	0.5085	0.2832
	70	0.9722	0.0559	0.9982	0.3613	0.1479
	80	0.7943	0.0555	0.9965	0.5157	0.3069
Page	50	0.0488	0.7969	0.9935	0.1518	0.0245
	60	0.0432	0.9006	0.9889	0.1508	0.0248
	70	0.0614	0.8602	0.9974	0.0701	0.0055
	80	0.0497	0.9798	0.9969	0.0070	0.0783

* k y n son los parámetros de los modelos utilizados.

Tabla 3.
Parámetros de los modelos a diferentes temperaturas de nopal deshidratado sin escaldar.

Modelo	Temperatura (°C)	k	n	R ²	RMSE	X ²
Henderson-Pabis	50	0.0212	0.4064	0.9916	0.4064	0.1784
	60	0.7621	0.0236	0.9906	0.2544	0.0708
	70	0.7769	0.0331	0.9912	0.1852	0.0392
	80	1.2408	0.0539	0.9889	0.2457	0.0755
Potencia	50	235.34	1.8047	0.8082	0.7102	0.5483
	60	169.92	1.8161	0.8916	0.5917	0.3871
	70	126.90	1.8782	0.9112	0.5429	0.3401
	80	324.22	2.255	0.8362	0.7315	0.6689
Peleg	50	1.7591	0.0638	0.9993	0.1818	0.0356
	60	1.3765	0.0642	0.9986	0.2633	0.0756
	70	1.0089	0.0639	0.9984	0.2732	0.0846
	80	1.0402	0.0604	0.9980	0.2141	0.0550
Page	50	0.0432	0.8601	0.9897	0.1974	0.0419
	60	0.0494	0.8708	0.9985	0.0819	0.0073
	70	0.0646	0.8739	0.9981	0.0829	0.0078
	80	0.0461	1.0125	0.9861	0.0801	0.0817

CONCLUSIONES

Se investigó la cinética de secado de nopal durante el secado por lecho fluidizado. Las curvas de velocidad de secado muestran que el secado de todas las muestras se lleva a cabo en el periodo de de velocidad decreciente. Los modelos de Page y Peleg mostraron un buen ajuste a los datos experimentales en el rango de temperaturas de 40 °C a 80 °C, de acuerdo a las restricciones establecidas de un valor de R² cercano a la unidad, RMSE con tendencia a valores de cero y χ^2 con valores tan pequeños como sea posible. Los valores de la difusividad, mostraron una dependencia de la temperatura de acuerdo con la ecuación de Arrhenius. El escaldado y la temperatura de secado tuvieron un efecto significativo sobre los valores de la difusividad, lo cual permitió una mejor transferencia de humedad. Los valores de energía de activación para la difusión de la humedad, se mostraron afectados por la temperatura de secado, mostrando con ello que se requiere mayor energía para remover la humedad de los trozos de nopal sin escaldar.

REFERENCIAS

- Akpınar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *J. Food Eng.* 73: 75-84.
- Akpınar, E. K., Bicer, Y., y Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *J. Food Eng.* 59(1): 99-104.
- Anaya-Pérez, M. A. (2001). History of the use of *Opuntia* as forage in México. In: C. Modragón-Jacobon & S. Pérez-González (Eds.), *Cactus (Opuntia spp.) as storage* (pp. 5-12). Rome, Italy: FAO.
- Arora, S.; Bharti, S. y Sehgal, V. K. (2006). Convective drying kinetics of red chillies. *Drying Technology*, 24: 189.193.
- Cárdenas-Medellín, M., Serna Saldívar, S. O., y Velazco de la Garza, J. (1998). Efecto de la ingestión de nopal crudo y cocido (*Opuntia ficus indica*) en el crecimiento y perfil del colesterol total, lipoproteínas y glucosa en sangre de ratas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 48(4): 317-323.

- Corrales-García, J., Peña-Valdivia, C. B., Razo-Martínez, Y. y Sánchez-Hernández, M. (2004). Acidity changes and pH buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biology and Technology*, 32: 169-174.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Oxford, U.K.: Clarendon Press.
- Dandamrongrak, R., Young, G., y Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *J. Food Eng.* 55(2): 139-146.
- Demirel, D., y Turhan, M. (2003). Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. *J. Food Eng.* 59(1): 1-11.
- Díaz-Romero, C., Díaz-Medina, E. M. y Rodríguez-Rodríguez, E. M. (2004). El higo pico: una alternativa agroalimentaria en Canarias. *Alimentación, Equipos y Tecnología*, 186, enero, 73-77.
- Doymaz, I, y Pala, M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *J. Food Eng.* 60(2): 125-130.
- Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng.* 61(3): 359-364.
- Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying system: I. An overview of drying principles and theory. *Energy Convers. Mgmt.* 40(6): 593-613.
- Ghazanfari, A.; Emami, S.; Tabil, L. G.; Panigrahi, S. (2006). Thin-layer drying of flax fiber: I. Analysis of modeling using Fick's second law of diffusion. *Drying Technol.*, 24: 1631-1635.
- Han, H. y Felker, P. (1997). Field validation of water-use efficiency of a CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, 36, 133-148.
- Houérou, H. (1996). The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environments*. 33(2): 135-159.
- Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., y Marinos-Kouris, D. (2003). Drying kinetics of some vegetables. *J. Food Eng.* 59(4): 391-403.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. y Jaouhari, J. T. (2004). Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *J. Food Eng.* 61(2): 173-179.
- Lee, G., Kang, W.S. y Hsieh, F. (2004). Thin-layer drying of chicory root slices. *Trans. ASAE* 47(5): 1619-1624.
- Madamba, P. S., Driscoll, R.H. y Buckle, A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlics slices. *J. Food Eng.* 29(1): 75-97.
- Maskan, A., Kaya, S. y Maskan, M. (2002). Hot air and sun drying of grape leather (pestil). *J. Food Eng.* 54(1): 81-88.
- Matsuhiro, B., Lillo, L., Sáenz, C., Urzúa, C. and Zárate, O. (2006). Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Polymer*, 63: 263-267.
- Mazza, G. (1983). Dehydration of carrots. Effects of pre-drying treatment on moisture transport and product quality. *J. Food Tech.* 18: 113-123.
- Panchariya, P.C., Popovic, D., y Sharma, L. (2002). Thin-layer modeling of black tea drying process. *J. Food Eng.* 52(4): 349-357.
- Ramesh, M. N., Wolf, W., Tevini, D. y Jung, G. (2001). Influence of processing parameters on the drying of spice paprika. *J. Food Eng.* 49(1): 63-72.
- Ranganna, S. (1986). *Handbook of analysis and quality control for fruit and vegetable products*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Rizvi, S. S. H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In *Engineering Properties of Foods*, 190-193. M. A. Rao and S. S. H. Rizvi, eds. New York, N.Y: Marcel Dekker.
- Sacilik, K. y Elicin, A. K. (2006). The Thin layer drying characteristics of organic apple slices. *J. Food Eng.* 73: 281-289.
- Sáenz, C. (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*, 46: 209-225.
- Sáenz-Hernández, C.; Corrales-García, J. y Aquino-Pérez, G. (2002). Nopalitos, mucilage, fiber and cochineal. In: P. S. Nobel (Ed.) *Cacti: Biology and uses* (pp. 211-234). Berkeley, Los Angeles. London: University of California Press.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C. y Roselló, C. (2005). Use exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetic of kiwi fruit. *J. Food Eng.* 66(3): 323-328.
- Vega, A., Fito, P., Andrés, A., y Lemus, R. (2007). Mathematical modeling of hot-drying air kinetics of red bell pepper (var. lamuyo). *J. Food Eng.* 79: 1460-1466.
- Wang, Z. F.; Sun, J. H.; Liao, X. J.; Chen, F.; Zhao, G. H.; Wu, J. H.; y Hu, X. S. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research Int.* 40: 39-46.
- Wolfram, R. M., Kritz, H., Efthimiou, Y., Stomatopoulos, J. y Sinzinger, H. (2002). Effect of prickly pear (*Opuntia robusta*) on glucose and lipid metabolism in non-diabetic with hyperlipidemia - A pilot study. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 114: 840-846.