

---

# CINÉTICAS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE PITAHAYA

---

## AMARILLA (*Selenicereus megalanthus*)

---

Alfredo A. Ayala Aponte, Carlos Julián Giraldo Cuartas y Liliana Serna Cock

### RESUMEN

En rodajas de pitahaya amarilla se evaluaron las cinéticas de deshidratación osmótica a presión atmosférica y con aplicación de pulso de vacío utilizando dos concentraciones de solución de sacarosa 55 y 65°Brix durante 4h a 30°C. Las cinéticas se evaluaron en términos de pérdida de agua ( $\Delta M_A$ ) y ganancia de sólidos ( $\Delta M_S$ ); así mismo se evaluaron los parámetros cinéticos del modelo de Magee ( $K_A$  y  $K_S$ ,  $k_A$  y  $k_{so}$ ), el índice de efectividad ( $\Delta M_A/\Delta M_S$ ) y el coeficiente de difusión efectivo ( $De$ ). No se

evidenciaron diferencias significativas de  $\Delta M_A$  al final del proceso osmótico por efecto de la presión, pero sí por el factor concentración de solutos de la solución osmótica. El coeficiente de difusión fue influenciado principalmente por el factor concentración, confirmando que el proceso de deshidratación osmótica favorece principalmente al fenómeno difusivo que al mecanismo hidrodinámico durante el proceso osmótico en pitahaya.

### KINETICS OF OSMOTIC DEHYDRATION OF YELLOW PITAHAYA FRUIT (*Selenicereus megalanthus*)

Alfredo A. Ayala Aponte, Carlos Julián Giraldo Cuartas and Liliana Serna Cock

### SUMMARY

The kinetics of osmotic dehydration was evaluated in slices of yellow pitahaya fruit at atmospheric pressure and under vacuum pulse application, using two concentrations of sucrose solution, of 55 and 65°Brix, for 4h at 30°C. The kinetics values were assessed in terms of water loss ( $\Delta M_A$ ) and solid gain ( $\Delta M_S$ ), and the Magee model kinetic parameters ( $K_A$  and  $K_S$ ,  $k_{so}$  and  $k_{A_o}$ ), the index of effectiveness ( $\Delta M_A/\Delta M_S$ ) and the effective diffusion

coefficients ( $De$ ) were also evaluated. No significant differences in  $\Delta M_A$  were evident at the end of the osmotic process as the effect of pressure, but differences were found as a result of the solute concentration of the osmotic solution. The diffusion coefficient was mainly influenced by concentration, confirming that the diffusive phenomena, rather than the hydrodynamic mechanism, favors the osmotic dehydration process.

### Introducción

La pitahaya amarilla está considerada entre las diez frutas promisorias para exportación y agro-industrialización en Colombia. Se le considera un fruto exótico apetecido no solo por su agradable sabor dulce sino también por su exuberante color y forma ovoide (Gomez *et al.*, 2004; Le-Bellec *et al.*, 2006; Ayala-Aponte *et al.*, 2009), además de sus propiedades biofuncionales y medicinales. Es un

cactus perenne y epifito nativo del trópico suramericano, y ha sido cultivada en América e Israel. Se caracteriza por tener una corteza blanda de color amarillo con espinas y una pulpa blanca delicada y aromática con pequeñas semillas negras comestibles. Colombia e Israel son los mayores productores de pitahaya amarilla en el mundo. Se estima que anualmente la producción de pitahaya en Colombia alcanza más de 2200Tn/año. Del total exportado en fresco (150Tn),

más del 70% se destina al mercado de la Unión Europea, 10% al de Asia y el 20% a otros mercados (Gomez *et al.*, 2004; Le-Bellec *et al.*, 2006). La producción de pitahaya se destina principalmente al mercado en fresco, siendo esto un limitante para la apertura de nuevos mercados en fruta procesada con valor agregado (Gomez *et al.*, 2004; Le-Bellec *et al.*, 2006; Ayala-Aponte *et al.*, 2009).

La deshidratación osmótica (DO) es una alternativa de

interés como método de conservación de productos vegetales, especialmente en frutas, debido a que es un proceso no térmico y de bajo costo. Consiste en la extracción de agua de un producto que es sumergido en una solución hipertónica por tiempo y temperatura específicos (Ayala *et al.*, 2009). La extracción se debe a la fuerza impulsora que se crea por la alta presión osmótica de la solución o por el gradiente de concentración entre la solución

---

### PALABRAS CLAVE / Coeficiente de Difusión / Deshidratación Osmótica / Pitahaya / Pulso de Vacío /

---

Recibido: 26/01/2010. Modificado: 24/05/2010. Aceptado: 07/06/2010.

**Alfredo A. Ayala Aponte.** Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle (Univalle), Colombia. Doctor en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor, Univalle,

Colombia. Dirección: Escuela de Ingeniería de Alimentos, Univalle, Cali, Colombia. e-mail: alfredo.ayala@correo.univalle.edu.co.

**Carlos Julián Giraldo Cuartas.** Ingeniero Químico y estudiante

de Doctorado en Ingeniería de Alimentos, Univalle, Colombia. e-mail: cajugicu@hotmail.com

**Liliana Serna Cock.** Especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Nacional (UNAL), Colombia. Docto-

ra en Ingeniería de Alimentos, Univalle, Colombia. Profesora, UNAL, Sede-Palmira, Colombia. e-mail: lsernac@palmira.unal.edu.co

**RESUMO**

Em rodajas de pitaya amarela foram avaliadas as cinéticas de desidratação osmótica a pressão atmosférica e com aplicação de pulso de vácuo utilizando duas concentrações de solução de sacarose 55 e 65°Brix durante 4h a 30°C. As cinéticas foram avaliadas em termos de perda de água ( $\Delta M_A$ ) e ganho de sólidos ( $\Delta M_S$ ); da mesma forma se avaliaram os parâmetros cinéticos do modelo de Magee ( $K_A$  e  $K_S$ ,  $k_A$  y  $k_{so}$ ), o índice de efetividade ( $\Delta M_A/\Delta M_S$ ) e o coeficiente de difusão efetivo ( $De$ ).

Não se evidenciaram diferenças significativas de  $\Delta M_A$  no final do processo osmótico por efeito da pressão, mas sim pelo fator de concentração de soluto da solução osmótica. O coeficiente de difusão foi influenciado principalmente pelo fator de concentração, confirmando que o processo de desidratação osmótica favorece principalmente ao fenômeno difusivo e menos ao mecanismo hidrodinâmico durante o processo osmótico na pitaya.

osmótica (SO) y el sólido a deshidratar (Rastogi y Raghavarao, 1996). La DO da lugar a tres tipos de transferencia de masa en contracorriente: transferencia de agua del producto a la solución osmótica, transferencia de soluto de la solución al producto y salida de solutos nativos (azúcares, ácidos orgánicos, minerales y vitaminas) del producto hacia la solución, considerándose esta última como despreciable por ser cuantitativamente pequeña (Van-Nieuwenhuijzen *et al.*, 2001; Sablani y Rahman, 2003).

El proceso se puede realizar a presión atmosférica y/o presión subatmosférica (vacío). Con presión de vacío las cinéticas de deshidratación son más rápidas y en algunas situaciones se mejora la calidad de los productos deshidratados en términos de textura, color y sabor, entre otros. Cuando se deshidrata a presión atmosférica se presentan los fenómenos de ósmosis y difusión, mientras que a presiones bajas (vacío) se presentan los mecanismos hidrodinámicos (HDM) y la capilaridad. La difusión tiene su fundamento en la diferencia de la actividad de agua entre el alimento y la solución osmótica, mientras que los HDM actúan principalmente al principio del proceso osmótico, modificando la composición global de la muestra y por tanto la fuerza impulsora del proceso difusivo. El HDM es consecuencia de un gradiente de presión del sistema, como resultado

de la acción combinada del flujo capilar y los cambios de presión impuesta sobre las estructuras porosas de los tejidos vegetales; está controlada por la desgasificación de la estructura porosa del alimento y/o penetración de líquido por capilaridad en los espacios intercelulares. Mediante la aplicación de presión de vacío se supone un aumento de la superficie de contacto sólido-líquido, contribuyendo al incremento de la pérdida de agua y la ganancia de solutos externos (Fito y Chiralt, 1997; Chafer *et al.*, 2003; Giraldo *et al.*, 2003).

La principal aplicación del proceso de DO es como pretratamiento a otros procesos de conservación de materiales biológicos, con el propósito de mejorar la calidad de los productos terminados, reducir el tiempo de proceso y ahorrar energía. Además de su utilización como pretratamiento, la DO tiene otras aplicaciones en la producción de materia prima para ser incorporada como ingrediente en productos de frutas tales como jaleas, mermeladas, helados, lácteos y confitados, todo lo cual le abre una excelente posibilidad para el aprovechamiento y la exportación de frutas (Yanyun y Jing, 2004; Falade y Igbeka, 2007).

El proceso de DO se puede evaluar en términos de parámetros cinéticos ( $K_A$  y  $K_S$ ,  $k_{A0}$  y  $k_{so}$ ) mediante el empleo del modelo de Magee (Ochoa-Martínez *et al.*, 2007). Los parámetros  $k_{A0}$  y  $k_{so}$  están

relacionados con ganancias netas al inicio del proceso por efecto de la presión, y las constantes  $K_A$  y  $K_S$  se relacionan con las velocidades de transferencia de masa. La relación entre pérdida de agua y ganancia de solutos ( $\Delta M_A/\Delta M_S$ ) es un índice empleado para evaluar la efectividad del proceso de osmodeshidratación y es considerado como un parámetro de calidad. Valores altos de esta relación indican una mejor condición del proceso osmótico (Silveira *et al.*, 1996; Ravindra y Chattopadhyay, 2000; Martins *et al.*, 2008). El coeficiente de difusión efectivo ( $De$ ) asociado a la rapidez en el transporte de masa (solutos o agua) es determinado en los procesos de DO; en general este coeficiente varía con la concentración de solutos de la SO y con la presión de vacío (Chiralt y Fito, 2003).

Salvo el trabajo de Ayala-Aponte *et al.* (2009) no se evidencia en la literatura estudios de DO sobre pitahaya amarilla. Estos autores evaluaron el efecto de la agitación sobre la DO de pitahaya a presión atmosférica sobre la pérdida de agua y ganancia de solutos, pero no se estudió la aplicación de presión de vacío y su influencia en los parámetros cinéticos de deshidratación. En el presente trabajo se evaluó la cinética de deshidratación osmótica en rodajas de pitahaya amarilla a presión atmosférica y con aplicación de un pulso de vacío, utilizando dos con-

centraciones de solutos en la solución osmodeshidratante, de 55 y 65°Brix. Las cinéticas fueron evaluadas en términos de pérdida de agua y ganancia de sólidos. Se evaluaron los parámetros cinéticos del modelo de Magee ( $K_W$  y  $K_S$ ,  $k_{wo}$  y  $k_{so}$ ), el índice de efectividad ( $\Delta M_A/\Delta M_S$ ) y el coeficiente de difusión efectivo ( $De$ ).

**Materiales y métodos***Material vegetal*

Se emplearon pitahayas amarillas (*Selenicereus megalanthus*) provenientes del departamento del Valle del Cauca, Colombia. Las frutas fueron cosechadas en estado de madurez cuatro, correspondiente a la clasificación de la norma NTC 3554 (Norma, 1996). A la pitahaya higienizada (con agua clorada 200 $\mu$ l·l<sup>-1</sup>) se le retiró la cáscara y posteriormente se cortó en rodajas de 5mm de espesor y 40mm de diámetro.

*Deshidratación osmótica y diseño experimental*

Se prepararon soluciones osmóticas de sacarosa comercial a 55 y 65°Brix a 30°C con un volumen de 10 litros cada una. Estas soluciones se agitaron a 240rpm mediante un agitador mecánico (Kika Labor Technik Pol Co, EEUU) para evitar el efecto de encostramiento del azúcar en la superficie de las muestras y acelerar el proceso de deshidratación. La relación

fruta:solución fue de 1:20. Las variables del proceso osmótico fueron concentración de solutos con 2 niveles, 55 y 65°Brix; y presión de trabajo con dos niveles, presión atmosférica (AT) y presión de vacío (PV). A los tratamientos con vacío se le aplicó un pulso de presión de 50kPa durante los primeros 5min de proceso y posteriormente se siguió deshidratando a presión atmosférica. Para evaluar las variables de respuesta, pérdida de agua ( $\Delta M_A$ ) y ganancia de sólidos solubles ( $\Delta M_S$ ), se tomaron muestras de pitahaya a diferentes tiempos de deshidratación (0, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180 y 240min). Una vez extraídas de la SO las muestras se enjuagaron en agua destilada para eliminar la solución remanente e inmediatamente se secaron con papel absorbente. Las muestras se pesaron antes y después de la deshidratación mediante una balanza analítica Metler (AE200) con sensibilidad de 0,001g. Para la determinación de los sólidos solubles se extrajo una parte de la fase líquida de las muestras y previamente homogeneizadas se llevaron a un refractómetro (ABBE ATAGO 1T, Zeiss, termostado a 20°C) con una precisión de  $\pm 0,5^\circ$ Brix. El contenido de humedad se determinó mediante el método 934.06 AOAC (1999). Las medidas experimentales se realizaron por triplicado para cada tratamiento osmótico.

Las variables de respuesta  $\Delta M_A$  y  $\Delta M_S$  fueron analizadas mediante un análisis de varianza (ANOVA) a los 60 y 240min de proceso. Estos tiempos obedecen a que al inicio del proceso de DO las cinéticas de deshidratación son más rápidas y a 240min se aproxima al pseudoequilibrio del proceso (Ayala-Aponte *et al.*, 2009). Para el análisis de estas variables se usó el programa estadístico SPSS. Las  $\Delta M_A$ ,  $\Delta M_S$  y la variación de peso ( $\Delta M_P$ ) se calcularon mediante las Ecs. 1-4. Los parámetros cinéticos ( $k_j$  y  $k_{j0}$ , j= A(agua), S(soluto) se determinaron mediante

el modelo de Magee según la Ec. 5 (Shafiur y Lamb, 1990; Sereno *et al.*, 2001; Chenlo *et al.*, 2006; Ochoa-Martínez *et al.*, 2007; Maldonado *et al.*, 2008). Estas constantes  $k_{A0}$  y  $k_{S0}$  (interceptos) están relacionadas con ganancias netas muy rápidas ocurridas en el tejido celular por acción del mecanismo hidrodinámico (HDM), mientras que las constantes cinéticas  $K_A$  y  $K_S$  (pendientes) están relacionadas con las velocidades de transferencia de masa asociadas con el mecanismo difusivo y osmótico (Fito y Chiralt, 1997). El índice de efectividad ( $\Delta M_A/\Delta M_S$ ) se calculó como el cociente de la Ec. 2 sobre la Ec. 3 en los tiempos 30, 120, 240min de deshidratación. Para el cálculo del coeficiente de difusión efectivo se tuvo en cuenta la geometría de las muestras de pitahaya (rodajas con configuración de disco, donde radio  $\gg$  espesor). Se aplicó la Ley de Fick en una placa plana de sección circular con radio (r), longitud característica ( $\delta$ ) para tiempos cortos ( $t \leq 3h$ ), donde 2L es el espesor de las muestras utilizando las Ecs. 6-12 (Rastogi *et al.*, 2002; Mahir y Ferruh, 2003; Ochoa-Martínez y Ayala-Aponte, 2005; Ochoa-Martínez *et al.*, 2009). En estas ecuaciones, m es la masa de cada muestra,  $x_A$  es el contenido de humedad,  $x_s$  son los sólidos solubles, t y t<sub>0</sub> son el tiempo en el instante t y tiempo inicial respectivamente e Y es la fuerza impulsora reducida (Ec. 8). Para la DO en condiciones atmosféricas la fuerza impulsora debida a efectos difusivos se puede determinar con la concentración de la fase líquida de la fruta (FLP), ya sea en térmi-

## ECUACIONES

$$\Delta M_P = \frac{m_t - m_o}{m_o} \quad (1)$$

$$\Delta M_A = \frac{m_t x_{At} - m_o x_{Ao}}{m_o} 100 \quad (2)$$

$$\Delta M_S = \frac{m_t x_{st} - m_o x_{so}}{m_o} 100 \quad (3)$$

$$\Delta M_P = \Delta M_A + \Delta M_S \quad (4)$$

$$\Delta M_j = k_j t^{0.5} + k_{j0} \quad j = P, A, S \quad (5)$$

$$1 - Y = \left( \frac{4D_e}{\pi \delta^2} \right)^{0.5} \sqrt{t} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{l}{1 + \frac{2l}{r}} \quad (7)$$

$$Y = \frac{z_{st} - z_{se}}{z_{so} - z_{se}} \quad (8)$$

$$z_{st} = \frac{x_{st}}{x_{st} + x_{wt}} \quad (9)$$

$$z_{so} \rightarrow z_s^{HDM} = \frac{m_{LP} z_{so} + m_i y_{so}}{m_{LP} + m_i} \quad (10)$$

$$m_{LP} = m_o (x_{Ao} + x_{so}) \quad (11)$$

$$m_i = m_o \cdot m_i^{HDM} \quad (12)$$

$$m_i^{HDM} = \frac{k_{so}}{100 y_{so}} \quad (13)$$

nos de agua ( $z_A$ ) o de sólidos ( $z_s$ ). Para que esta fuerza impulsora sea comparable con los tratamientos a vacío (PV) se debe considerar el efecto HDM sobre la ganancia inicial de cierta cantidad de solución osmótica (SO) impregnada; por consiguiente se consideró como concentración o composición inicial de la FLP aquella alcanzada

con esta impregnación después del vacío, de tal forma que  $z_{so} = z_{so}^{HDM}$  (Ecs. 10-13; Moreno *et al.*, 2004; Yanyun y Jing, 2004; Heiping *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2008). En las anteriores ecuaciones  $m_{LP}$ ,  $m_i$ ,  $m_o$  y  $m_i^{HDM}$  son respectivamente la masa de la fase líquida, masa impregnada, masa de la muestra en el tiempo inicial y la masa impregnada debido al efecto HDM (Fito y Chiralt, 1997; Escriche *et al.*, 2000; Chafer *et al.*, 2001; Panades *et al.*, 2008). Al considerar la FLP como una solución binaria los coeficientes de difusión tanto del agua como del soluto se considerarán iguales. Para cada tratamiento se consideró como composición o concentración de equilibrio ( $z_{se}$ ) la concentración de la solución osmótica ( $y_s$ ) es decir,  $z_{se} \sim y_s$  (Fito y Chiralt, 1997).

## Resultados y discusión

En la Tabla I se presentan, para los distintos tratamientos, los promedios de contenido de humedad, sólidos solubles y masa iniciales en rodajas de pitahaya. En la Figura 1 se muestra la relación  $\Delta M_P$  vs ( $\Delta M_A + \Delta M_S$ ) para verificar los balances de materia de los tratamientos osmóticos. Se observa que las pendientes de las rectas ajustadas a los puntos experimentales presentan valores relativamente cercanos a 1 en los diferentes tratamientos. Las diferencias del valor de estas pendientes con el valor esperado ( $\sim 1$ ) durante el proceso osmótico se deben posiblemente al desprendimiento de semillas en las rodajas de pitahaya durante la DO. Este compor-

TABLA I  
CONTENIDO DE HUMEDAD, SÓLIDOS SOLUBLES Y  
MASA EN MUESTRAS DE PITAHAYA FRESCA

Parámetro	55°Brix		65°Brix	
	AT	PV	AT	PV
$m_o$ (g)	8,540 $\pm$ 0,369	8,310 $\pm$ 0,127	8,730 $\pm$ 0,267	9,830 $\pm$ 0,315
$X_{Ao}$	0,738 $\pm$ 0,011	0,748 $\pm$ 0,015	0,763 $\pm$ 0,018	0,745 $\pm$ 0,017
$X_{So}$	0,220 $\pm$ 0,003	0,220 $\pm$ 0,003	0,190 $\pm$ 0,004	0,200 $\pm$ 0,003

tamiento se ha observado en la DO del Kiwi (Escriche *et al.*, 2000).

En la Figura 2 se presentan las cinéticas de pérdida de agua ( $\Delta M_A$ ) y ganancia de sólidos ( $\Delta M_S$ ) en los diferentes tratamientos osmóticos de rodajas de pitahaya amarilla. Los valores en  $\Delta M_A$  varían entre 0,58 y 0,99%, mientras que los de  $\Delta M_S$  entre 0,32 y 0,66%. Se observa que durante el tiempo de proceso se incrementa la pérdida de agua y la ganancia de solutos en todos los tratamientos. A los 60min de DO se evidencia un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) tanto de la presión de trabajo como de la concentración

de solutos sobre la pérdida de agua. Asimismo, se evidenció un efecto significativo en la interacción entre estos factores ( $p < 0,05$ ), lo cual significa que las diferencias de la pérdida de agua no solo dependen de un factor. El tratamiento MA-65PV (65°Brix con pulso de vacío) presentó la mayor pérdida de agua con 16,9%, mientras que el tratamiento correspondiente a presión atmosférica (MA-65AT) alcanzó 14,6%. Para los tratamientos deshidratados a 55°Brix el comportamiento fue similar, presentando mayor pérdida de agua el tratamiento MA-55PV con 13,4%, mientras que MA-55AT al-

canzó 10,5%. De acuerdo a lo anterior, los tratamientos deshidratados a 65°Brix favorecieron la pérdida de agua en rodajas de pitahaya amarilla, siendo mayor el de pulso de vacío. Para tiempos superiores a 60min no se presentaron diferencias significativas en  $\Delta M_A$  entre los tratamientos de presión atmosférica y de vacío (factor presión), pero

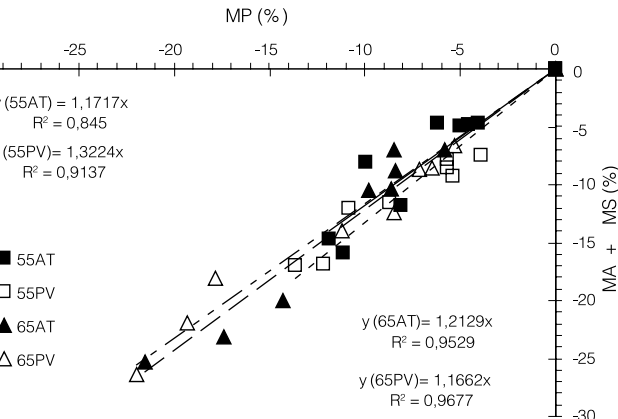


Figura 1. Balance de materia ( $\Delta M_p$  vs  $\Delta M_A + \Delta M_S$ ) de los tratamientos osmóticos.

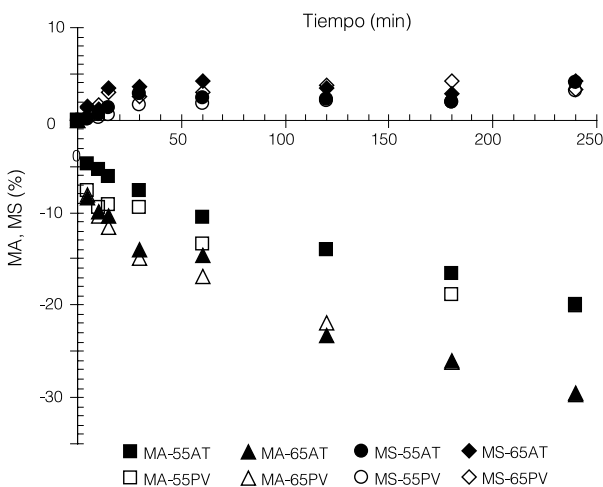


Figura 2. Cinéticas de pérdida de agua ( $\Delta M_A$ ) y ganancia de sólidos ( $\Delta M_S$ ) durante la DO de pitahaya amarilla.

**TABLA II**  
**CONSTANTES CINÉTICAS DEL**  
**MODELO DE MAGEE (EC. 5) PARA**  
**LA PÉRDIDA DE AGUA ( $\Delta M_A$ )**  
**Y GANANCIA DE SÓLIDOS ( $\Delta M_S$ )**

Parámetro cinético	55°Brix		65°Brix	
	AT	PV	AT	PV
$K_s$ ( $s^{-0,5}$ )	0,027	0,025	0,026	0,026
$k_{so}$ (%)	0,257	-0,055	1,330	1,137
$R^2$	0,682	0,883	0,500	0,696
$K_A$ ( $s^{-0,5}$ )	-0,154	-0,141	-0,226	-0,222
$k_{Ao}$ (%)	-1,187	-3,783	-3,038	-3,632
$R^2$	0,991	0,908	0,970	0,968

sí en el factor concentración de solutos de la solución osmótica. El ANOVA al final del proceso (240min) no evidenció diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre los tratamientos por efecto de la presión; alcanzando valores similares de  $\Delta M_A$  de ~19,9% entre los tratamientos deshidratados a 55°Brix y de 29,6% entre los de 65°Brix.

Es evidente el efecto significativo que tiene la presión sobre  $\Delta M_A$  en los primeros 60min, pero no al final del proceso osmótico. Resultados similares han sido reportados en distintos vegetales (Rastogi y Raghavarao, 1996; Rastogi *et al.*, 1997; Chavarro *et al.*, 2006). Este comportamiento se debe posiblemente a la relativa baja porosidad de

la fruta, que de acuerdo a la porosidad de la pitahaya con grado de madurez cuatro es de  $2,78 \pm 0,35\%$  (Ayala-Aponte *et al.*, 2009). Puede notarse que el pulso de vacío solo favoreció la velocidad de deshidratación al inicio del proceso osmótico y no al final, debido al intercambio rápido entre el gas ocluido o líquido interno en los poros y la solución externa una vez se restituyó la presión atmosférica.

En cuanto al factor concentración, se evidenció un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) sobre la  $\Delta M_A$  entre los tratamientos osmóticos a una presión fija. Rastogi y Raghavarao, (2004) encontraron este mismo comportamiento en la DO de piña. No se observó una interacción significativa entre los factores presión y concentración ( $p > 0,05$ ). Con respecto a la ganancia de so-

lutos ( $\Delta M_S$ ) se observaron bajas ganancias durante el proceso osmótico, del orden del 4%, y de acuerdo al ANOVA no se evidencian diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) entre los cuatro tratamientos. Este comportamiento puede explicarse probablemente por la baja porosidad de la fruta en fresco, dificultando la entrada de solutos (sacarosa) a la estructura celular. La Tabla II, muestra los parámetros cinéticos del modelo de Magee (Ec. 5) de los tratamientos experimentales. El modelo evidencia mejor ajuste en la variable pérdida de agua que en la ganancia de sólidos, por presentar mayores valores de  $R^2$ , con  $R^2 > 0,90$ , mientras que la ganancia de sólidos presentó  $R^2 < 0,88$ ; esto es coherente con la menor variación de los solutos durante y al final del proceso.

Las constantes de velocidad para la transferencia de solutos ( $K_s$ ) son menores en términos absolutos que las correspondientes en las constantes de velocidad de pérdida de agua ( $K_A$ ). Puede notarse, que la constante de velocidad  $K_A$  está más fuertemente afectada por el aumento de la concentración de la solución osmótica que por la aplicación del pulso de vacío. Este comportamiento parece indicar que la estructura celular de la pitahaya favorece al fenómeno difusivo frente al mecanismo hidrodinámico durante el proceso osmótico. Con respecto a la constante de velocidad de solutos  $K_s$  no se evidencia influencia del pulso de vacío y de la concentración de solutos; en los tratamientos deshidratados a 55°Brix se evidenció un ligero descenso de 0,027 a 0,025; mientras que en los deshidratados a 65°Brix se obtuvieron valores iguales (0,026). Estos resultados pueden explicarse probablemente por la baja porosidad de la fruta, y otra posible explicación puede ser la ganancia rápida de solutos al inicio del proceso, provocando posteriormente un freno a la entrada de los solutos en la fruta. Este comportamiento se

ha encontrado en la DO de kiwi (Escriche *et al.*, 2000) y de cáscara de mandarina (Chafer *et al.*, 2001), mientras que resultados contrarios se encontraron en fresa, piña (Shi *et al.*, 1995) y guayaba (Panades *et al.*, 2008).

Para la constante de pérdidas de agua ( $k_{A0}$ ) ocurrida a tiempos muy cortos de proceso, los tratamientos mostraron una ordenada negativa. Este valor negativo puede atribuirse a una transferencia más rápida de agua al inicio del proceso desde las células más externas y a la salida de la fase líquida nativa libre de la fruta (menos concentrado en general que el líquido intracelular). Esta transferencia está potenciada por el pulso de vacío. De hecho, en los tratamientos con aplicación de vacío presentaron valores mayores en términos absolutos de  $k_{A0}$  que los correspondientes tratamientos con presión atmosférica, siendo más significativo para los tratamientos a 55°Brix. Shi *et al.* (1995) y Escriche *et al.* (2000) encontraron resultados similares en la DO de algunas frutas. Para la constante  $k_{s0}$  (ganancia de solutos) se observan valores ligeramente menores en los tratamientos con pulso de vacío. Comportamiento similar fue encontrado en la DO de piña (Shi *et al.*, 1995) y de mango (Giraldo *et al.*, 2003), y contrario en pera (Chafer *et al.*, 2003), Kiwi (Escriche *et al.*, 2000) y guayaba (Panades *et al.*, 2008). Este resultado puede explicarse de la misma manera como en el análisis de

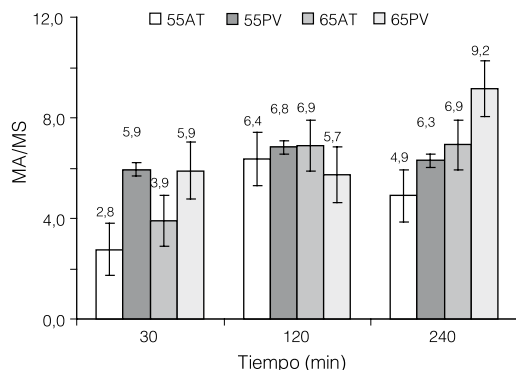


Figura 3. Variación del índice de efectividad ( $\Delta M_A/\Delta M_S$ ) en tres tiempos (30, 120 y 140min) de DO de pitahaya amarilla.

la constante  $K_s$ .

En la Figura 3 se presentan, para tres tiempos de deshidratación osmótica, los

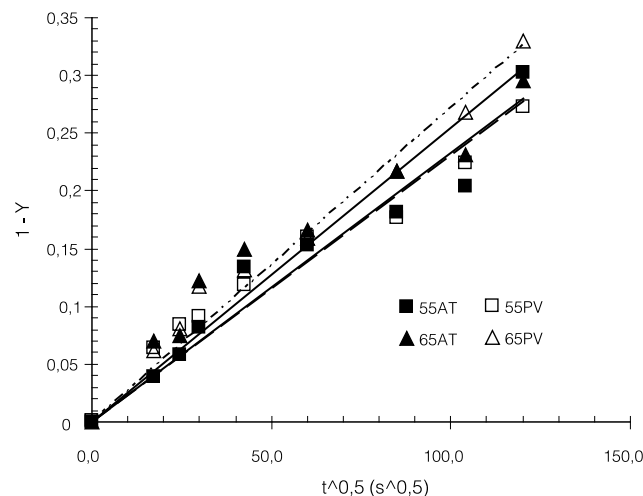


Figura 4. Evolución de la fuerza impulsora frente a la raíz cuadrada del tiempo en los diferentes tratamientos osmóticos de pitahaya.

valores de la variación  $\Delta M_A/\Delta M_S$  (índice de efectividad) para los cuatro tratamientos osmóticos utilizados. Valores altos indican que el proceso osmótico es más efectivo, debido a que  $\Delta M_A$  es mayor que  $\Delta M_S$  (Ravindra y Chatopadhyay, 2000; Matuska *et al.*, 2006). En la figura se observa que el índice de efectividad al inicio del proceso está más influenciado por las condiciones de presión que por la diferencia de concentración de la solución osmótica, siendo mayor para los tratamientos con aplicación de vacío. A los 120min de proceso los índices de efectividad presentaron valores cercanos entre los tratamien-

tos, lo que puede ser un indicio de la disminución en las velocidades de pérdida de agua y/o ganancia de solutos (Barat *et al.*, 1999; Chenlo *et al.*, 2006). Al final del proceso osmótico (240min) se evidenció que este parámetro se incrementa con el nivel de concentración de solutos y de la presión, siendo más significativo en la concentración.

En la Figura 4, se muestra la relación lineal entre  $1-Y$  y la raíz cuadrada del tiempo de proceso (Ec. 6). De la pendiente de la recta ajustada de cada tratamiento osmótico se calculó el coeficiente de difusión

(Tabla III) asociado a la rapidez en el transporte de masa. De acuerdo a Chiralt y Fito (2003) y Giraldo *et al.* (2003), el coeficiente de difusión en general se incrementa con el aumento de concentración de la SO y por la aplicación de vacío. Se observa que la concentración de la solución ejerce mayor influencia sobre el coeficiente de difusión que la presión aplicada. Puede notarse que De se incrementa conforme aumenta la concentración de la solución tanto para los tratamientos a presión atmosférica (AT) como a los de vacío (PV). Algunos autores han reportado este mismo resultado en algunos vegetales deshidratados a presión atmosférica (Rastogi y Raghavarao, 1996; Rastogi *et al.*, 1997; Rastogi y Raghavarao, 2004; Ayse Ispir, 2009). En cuanto al efecto de la presión de vacío sobre De se evidencia un incremento en la concentración de 65°Brix, incremento que está acorde

con los reportados en otras frutas (Fito y Chiralt, 1997; Ochoa-Martinez *et al.*, 2007). Este incremento está influenciado posiblemente por la eliminación de la fracción de gas de las muestras tratadas con pulso de vacío, comportando un incremento en el volumen efectivo para la difusión. Lo anterior no se cumple en los tratamientos a 55°Brix, donde De permaneció constante, debido posiblemente a la baja porosidad de la matriz celular de la fruta (Chiralt y Fito, 2003). De acuerdo a estos resultados se puede afirmar que la estructura celular de la pitahaya favorece principalmente

TABLA III  
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN (De) DE FLP EN LA DO DE PITAHAYA AMARILLA

°Brix	Pendiente = $(4De/\pi\delta^2)^{0.5}$	
	AT	PV
55	0,0023	0,0023
65	0,0025	0,0027
R <sup>2</sup>		
55	0,9467	0,9406
65	0,9111	0,9722
Dex10 <sup>11</sup> (m <sup>2</sup> /s)		
55	1,6619	1,6619
65	1,9635	2,2902

al fenómeno difusivo que al mecanismo hidrodinámico durante el proceso osmótico. Al comparar los valores de De en las rodajas de pitahaya con otros productos como mango, pera, manzana, guayaba y cáscara de naranja, se evidencia igualdad en el orden de magnitud de  $10^{-11}$  pero con valores menores en el coeficiente de difusión (Barat *et al.*, 2001; Chafer *et al.*, 2001, 2003; Giraldo *et al.*, 2003; Panades *et al.*, 2008).

### Conclusiones

Para las condiciones evaluadas durante la deshidratación osmótica de pitahaya, la aplicación de presión de vacío y la concentración de solutos de la solución osmótica favorecen la pérdida de agua ( $\Delta M_A$ ) durante los primeros 60min de proceso,

alcanzado en este periodo de tiempo la mayor ganancia de sólidos ( $\Delta M_s$ ). Para tiempos superiores solo la concentración de la solución influye significativamente en la pérdida de agua. Se puede afirmar que el proceso de deshidratación osmótica de rodajas de pitahaya favorece más al fenómeno difusivo que al mecanismo hidrodinámico. Los resultados sugieren que la osmódeshidratación de Pitahaya amarilla a presión atmosférica es una técnica que puede utilizarse como pretratamiento en la agroindustrialización de la fruta.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia y a ASOPPITAYA por la financiación de esta investigación, que hace parte del proyecto "Alternativas Agroindustriales con Alto Valor Agregado para la Manipulación, Empaque y Conservación de Pitahaya".

#### REFERENCIAS

- AOAC (1999) Method 934.06. Moisture in dried fruits. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists International*.
- Ayala-Aponte AA, Serna-Cock L, Giraldo-Cuarta CJ (2009) Efecto de la agitación sobre la deshidratación osmótica de pitahaya amarilla (*Selenicereus Megalanthus* S.) empleando soluciones de sacarosa. *Interciencia* 34: 492-496.
- Barat JM, Albors A, Chiralt A, Fito P (1999) Equilibration of apple tissue in osmotic dehydration: microstructural changes. *Dry. Technol.* 17: 1375-1386.
- Barat JM, Chiralt A, Fito P (2001) Effect of osmotic solution concentration, temperature and vacuum impregnation pretreatment on osmotic dehydration kinetics of apple slices. *Food Sci. Technol. Int.* 7: 451-456.
- Chafer M, González-Martínez C, Fernández B, Pérez L, Chiralt A (2003) Effect of blanching and vacuum pulse application on osmotic dehydration of pear. *Food Sci. Technol. Int.* 9: 321-328.
- Chafer M, González-Martínez C, Ortolá MD, Chiralt A, Fito P (2001) Kinetics of osmotic dehydration in orange and mandarin peels. *J. Food Proc. Eng.* 24: 273-289.
- Chavarro LM, Ochoa-Martínez CI, Ayala-Aponte AA (2006) Efecto de la madurez, geometría y presión sobre la cinética de transferencia de masa en la deshidratación osmótica de papaya (*Carica papaya* L., var. Maradol). *Cienc. Tecnol. Alim.* 26: 596-603.
- Chenlo F, Chaguri L, Santos F, Moreira R (2006) Osmotic dehydration/impregnation kinetics of padrón pepper (*Capsicum annuum* L. *Longum*) with sodium chloride solutions: process modelling and colour analysis. *Food Sci. Technol. Int.* 12: 221-227.
- Chiralt A, Fito P (2003) Transport mechanism in osmotic dehydration: the role of the structure. *Food Sci. Technol. Int.* 9: 179-186.
- Escriche I, García-Pinchi R, Andrés A, Fito P (2000) Osmotic dehydration of kiwifruit (*Actinidia Chinensis*): fluxes and mass transfer kinetics. *J. Food Proc. Eng.* 23: 191-205.
- Falade KO, Igbeka JC (2007) Osmotic dehydration of tropical fruits and vegetables. *Food Rev. Int.* 23: 373-405.
- Fito P, Chiralt A (1997) Osmotic dehydration: an approach of the modelling of solid food liquid operations. En Fito P, Ortega-Rodríguez E, Barbosa-Canovas GV (Eds.) *Food Engineering 2000*. Cap. 13. Chapman and Hall. New York, EEUU. pp. 231-252.
- Giraldo G, Talens P, Fito P, Chiralt A (2003) Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *J. Food Eng.* 58: 33-43.
- Gómez C, Dueñas J, Garzón MC, Medina J, Moreno Z, Perdomo C, Pizarro J, Villarreal A (2004) *Pitahaya Amarilla. Informe Inteligencia de Mercados*. Perfil de Producto # 33, Corporación Colombiana Internacional. www.cci.org.co (Cons. 18/02/2009).
- Heping Li, HS Ramaswamy (2006) Osmotic dehydration of apple cylinders: i. conventional batch processing conditions. *Dry. Technol.* 24: 619-630.
- Ispir A, Togrul IT (2009) Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters. *Chem. Eng. Res. Des.* 87: 166-180.
- Le-Bellec F, Vaillant F, Imbert E (2006) Pitahaya (*Hylocereus* spp.): A new fruit crop, a market with a future. *Fruits* 61: 237-250.
- Maldonado S, Santapaola JE, Singh J, Torrez M, Garay A (2008) Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Cienc. Tecnol. Alim. Campinas* 28: 251-256.
- Martins MCP, Cunha AL, Silva MR (2008) Effect of dehydration osmotic conditions on the quality of cashew apple from cerrado. *Cienc. Tecnol. Alim. Campinas* 28: 158-165.
- Matuska M, Lenart A, Lazarides HN (2006) On the use of edible coatings to monitor osmotic dehydration kinetics for minimal solids uptake. *J. Food Eng.* 72: 85-91.
- Moreno J, Bagueño G, Velasco V, Petzold G, Tabilo-Munizaga G (2004) Osmotic dehydration and vacuum impregnation on physicochemical properties of Chilean papaya (*Carica candamarcensis*). *J. Food Sci.* 69: 102-106.
- Norma (1996) NTC-3554: *Frutas Frescas-Pitahaya Amarilla*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (INCONTEC). Bogotá, Colombia.
- Ochoa-Martínez CI, Ayala-Aponte AA (2005) Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *Cienc. Tecnol. Alim.* 4: 330-342.
- Ochoa-Martínez CI, Ramaswamy HS, Ayala-Aponte AA (2007) A comparison of some mathematical models used for the prediction of mass transfer kinetics in osmotic dehydration of fruits. *Dry. Technol.* 25: 1613-1620.
- Ochoa-Martínez CI, Ramaswamy HS, Ayala-Aponte AA (2009) Suitability of Crank's solutions to Fick's second law for water diffusivity calculation and moisture loss prediction in osmotic dehydration of fruits. *J. Food Proc. Eng.* 32: 933-943.
- Panades G, Castro D, Chiralt A, Fito P, Núñez M, Jiménez R (2008) Mass transfer mechanisms occurring in osmotic dehydration of guava. *J. Food Eng.* 87: 386-390.
- Rahman MS, Lamb J (1990) Osmotic dehydration of pineapple. *J. Food Sci. Tech. Mys.* 27: 150-152.
- Rastogi NK, Raghavarao KSMS (1996) Kinetics of osmotic dehydration under vacuum. *Lebensm. Wiss. Technol.* 52: 669-672.
- Rastogi NK, Raghavarao KSMS (2004) Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensm. Wiss. Technol.* 37: 43-47.
- Rastogi NK, Raghavarao KSMS, Niranjana K (1997) Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. *J. Food Eng.* 31: 423-432.
- Rastogi NK, Raghavarao KSMS, Niranjana K, Knorr D (2002) Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends Food Sci. Technol.* 13: 48-59.
- Ravindra MR, Chattopadhyay PK (2000) Optimisation of osmotic pre-concentration and fluidised bed drying to produce dehydrated quick-cooking potato cubes. *J. Food Eng.* 44: 5-11.
- Sablani SS, Rahman MS (2003) Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Res. Int.* 36: 65-71.
- Sereno AM, Moreira R, Martínez E (2001) Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *J. Food Eng.* 47: 43-49.
- Shi QX, Fito P, Chiralt A (1995) Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *Food Res. Int.* 28: 445-454.
- Silveira ETF, Rahman MS, Buckle KA (1996) Osmotic dehydration of pineapple: kinetics and product quality. *Food Res. Int.* 29: 227-233.
- Turhan M, Erdogdu F (2003) Error associated with assuming a finite regular geometry as an infinite one for modeling of transient heat and mass transfer processes. *J. Food Eng.* 59: 291-296.
- Van-Nieuwenhuijzen NH, Zareifard MR, Ramaswamy HS (2001) Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes. *Dry. Technol.* 19: 525-545.
- Zhao Y, Xie J (2004) Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing. *Trends Food Sci. Technol.* 15: 434-451.