

Cinética de la Transferencia de Masa en la Deshidratación Osmótica de Mango (*Mangifera indica L.*) var. Tommy Atkins en Función de la Temperatura

Lorena Arias, Yorledis Perea y José E. Zapata*

Grupo de Nutrición y Tecnología de Alimentos, Universidad de Antioquia, Calle 67 Número 53-108, Medellín-Colombia. (e-mail: lore1114msn@hotmail.com, ever.0303@hotmail.com, jedgar_4@yahoo.es*)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Ago. 13, 2016; Aceptado Oct. 11, 2016; Versión final Dic. 12, 2016, Publicado Jun. 2017

Resumen

Se estudió la cinética de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de mango (*Mangifera indica L.*) var. Tomy Atkins en láminas. Se utilizó una relación jarabe/fruta de 3/1 durante 6 h de proceso. Se compararon tres modelos matemáticos para describir la cinética de pérdida de agua y ganancia de sólidos a diferentes temperaturas (20, 35 y 50 °C) y concentraciones de sacarosa (45-60 °Bx). Se ajustó el modelo empírico de Azuara, un modelo fenomenológico a partir de la solución de la segunda ley de Fick y el modelo empírico de Peleg. Los resultados indicaron que el modelo de Peleg ajustó mejor que el modelo empírico de Azuara y que el modelo fenomenológico derivado de la ley de Fick. Adicionalmente se hizo un ajuste tipo Arrhenius para los coeficientes de difusión efectiva a 60 °Bx, en función de la temperatura.

Palabras clave: difusión efectiva; segunda ley de Fick; modelos empíricos; modelos fenomenológicos

Kinetic of the Mass Transfer Process in the Osmotic Dehydration of Mango (*Mangifera indica L.*) var. Tommy Atkins as Function of the Temperature

Abstract

The kinetics of the mass transfer process during the osmotic dehydration of mango sheets (*Mangifera indica L.*) var. Tomy Atkins was studied. The syrup/fruit ratio was 3/1 during the six hour process. Three mathematical models to describe the kinetics of water loss and solid gain at different temperatures (20, 35 and 50 °C) and sucrose concentrations (45 and 60 %) were used compared to each other. The empirical model of Azuara, a phenomenological model from solution of Fick's second law, and Peleg's empiric model were used. The results shown that empirical model of Peleg gave more accurate results than the empirical model of Azuara and the phenomenological model from solution of Fick's second law. Additionally, an Arrhenius equation for the effective diffusion coefficient as a function of the temperature function (for 60 °Bx concentration) was fitted

Keywords: effective diffusion; Fick's second law; empirical models; phenomenological models

INTRODUCCIÓN

El mango es una de las frutas tropicales que más ampliamente se consumen en el mundo, su comercialización como fruta fresca y como producto cortado está ganando cada vez más importancia (Torres et al., 2007). Sin embargo la fruta fresca cortada tiene una muy breve vida útil, debido a las dificultades para mantener las características originales en la fruta fresca (Soliva-Fortuny y Martín-Belloso, 2003). Esto se debe a que algunas operaciones durante el cortado inducen cambios en las características fisicoquímicas y fisiológicas, por efecto de la mayor acción enzimática y algunos cambios fisiológicos (Toivonen y Brummell, 2008). Esto se suma a que las pérdidas por manejo poscosecha representan entre 20 – 25 % de la producción de frutas, aun en países desarrollados (Sharma et al., 2009) y en países en vía de desarrollo son mayores debido a inadecuadas condiciones de transporte y almacenamiento (Sharma et al., 2009).

Una alternativa para prolongar la vida útil de los productos cortados, es la deshidratación osmótica (DO), la cual reduce parcialmente el agua en la fruta, disminuyendo la actividad acuosa y la posibilidad de deterioro fisicoquímico y microbiológico. Es un proceso que involucra bajos costos de inversión y es de fácil implementación, lo que la convierte una excelente alternativa de procesamiento en áreas rurales, para prolongar la vida útil de los productos cortados. Ofrece la posibilidad de hacer un pretratamiento y darle valor agregado a las frutas y verduras, posibilitando mejorar el nivel de ingresos de los cultivadores. Por sus características en cuanto a calidad organoléptica y nutricional (Ozdemir et al., 2008), es una opción muy ventajosa para los productores puesto que les permite asegurar mercado aún en épocas de abundancia y absorber frutas de inferior calidad incluso con daños físicos, que no permiten ser comercializadas en fresco.

Desde el punto de vista de la transferencia de masa, la deshidratación osmótica es un proceso complejo de contra-difusión simultáneo de agua y solutos en el cual la velocidad de transferencia de masa disminuye hasta alcanzar el equilibrio en el que la tasa neta de transporte de masa es nula (Sareban y Abbasi Souraki, 2016). En dicho proceso la transferencia de masa depende de factores como la presión (Reyes *et al.*, 2008), la temperatura (Herman et al., 2013), la concentración de la solución osmodeshidratante (Corzo y Bracho, 2004), la relación jarabe/fruta (Da Conceição Silva et al., 2012), el grado de agitación del medio, (Reyes et al., 2008), la estructura, forma y tamaño del alimento (Ruiz et al., 2010) y la naturaleza y el peso molecular del soluto osmótico (Tsamoia et al., 2005). Sin embargo, no siempre se cuenta con información suficiente que permita que los procesos de transformación que sean desarrollados a pequeña escala, puedan implementarse a escala industrial (Lewicki y Lenart, 2015).

La gran complejidad del proceso de transferencia de masa hace que la predicción precisa sea difícil y que dependa de la determinación apropiada de las condiciones de equilibrio y de parámetros como la difusión efectiva. Por tal razón para simplificar el tratamiento del fenómeno se suele interpretar la información experimental mediante modelos empíricos y semiempíricos los cuáles son válidos solamente para reproducir condiciones semejantes a las experiencias de las que se obtuvieron los datos (Della, 2010). En este tipo de modelos se pueden citar los de Azuara (1992) y Peleg (1988). Por lo general, cuando se quiere utilizar un modelo fenomenológico para procesos llevados a cabo a presión atmosférica, se utilizan expresiones de la solución de la segunda ley de Fick, que describen el mecanismo difusional (Crank, 1975), las cuales han sido usadas para describir la transferencia de masa en DO de sólidos en soluciones con altas relaciones solución/sólidos en una dimensión (Abbasi-Souraki et al., 2013) y en varias dimensiones (Ruiz et al., 2010). Así como en soluciones con bajas relaciones solución/sólidos en una dirección (Sareban y Abbasi Souraki, 2016) y en varias direcciones (Ruiz et al., 2010). Sin embargo es importante poder comparar el desempeño predictivo de modelos empíricos y fenomenológicos, así como profundizar en las ventajas de uno y otro tipo. Igualmente, los resultados cinéticos son muy específicos, por lo que la aplicación a escala industrial en un producto dado, requiere de resultados a escala a de laboratorio con el mismo producto. El objetivo del presente trabajo fue estudiar el comportamiento cinético en la DO de mango Tommy atkins a dos concentraciones de sacarosa (45°Bx y 60°Bx) y tres temperaturas (20°C, 35°C y 50 °C), para evaluar el efecto que la temperatura tiene sobre la transferencia de masa en este proceso.

METODOLOGIA

La metodología contiene varias sub-secciones: una para obtención y preparación de la materia prima, otra que describe el tratamiento al que fue sometido el producto y por último la subsección de modelado cinético de los parámetros más importantes del proceso la cual se deriva en tres sub-subsecciones.

Preparación de la materia prima

Se trabajó con mango (*Mangifera indica* L.) var. Tommy Atkins, estos fueron adquiridos en un supermercado de la ciudad de Medellín (Colombia). Para su selección se empleó una tabla de color que es una escala de madurez según la NTC 5210 (Icontec, 2003) que se establece mediante la observación directa de la pulpa. Se trabajó con un estado de madurez de color 3 que indica una pulpa de color amarillo intenso y este nivel se

confirmó por medio de la determinación de los sólidos solubles totales en un rango de 10,6 a 12,3 °Bx. La fruta se lavó con detergente alcalino, se desinfectó con Citrosan (0,2 %), se peló y cortó en láminas de 2 cm de largo x 1 cm de alto y 1 cm de espesor.

Métodos analíticos

Se analizó la humedad con el método 934.06 de la AOAC (AOAC, 1984) y la concentración de sólidos solubles (SS), con un refractómetro LR 45227 (Milton Roy Company®, USA).

Deshidratación osmótica

La deshidratación se llevó a cabo durante 6 h a dos concentraciones de sacarosa (45°Bx y 60°Bx) en una relación jarabe/fruta 3/1 y a tres temperaturas (20°C, 35°C, y 50°C). En recipientes de vidrio de 500 mL sumergidos en un baño de agua con agitación orbital (ThermoScientific, MaxQ 4000). Cada 60 minutos se extrajo muestra, fue escurrida y secada con papel absorbente para eliminar el exceso de jarabe y se procedió a determinar el contenido de humedad y °Bx. Cada ensayo se realizó por duplicado.

Modelamiento de la cinética de la DO de láminas de mango

Se determinaron los parámetros más importantes del proceso de DO, como porcentaje en pérdida de humedad (PH) y el porcentaje en ganancia de sólidos solubles (GS), de acuerdo a las ecuaciones 1-2 respectivamente. Estos parámetros se ajustaron en función del tiempo por medio de un modelo empírico de penetración, propuesto por Azuara et al. (1992). También se usó un modelo fenomenológico a partir de la solución de la segunda ley de Fick (Crank, 1975) y un modelo empírico propuesto por Peleg en 1988, para ajustar el comportamiento cinético en la DO del mango.

$$PH(\%) = \frac{(x_{wi} - x_{wt})}{x_{wt}} * 100 \quad (1)$$

$$GS(\%) = \frac{(x_{st} - x_{si})}{x_{st}} * 100 \quad (2)$$

Donde: x_{wi} y x_{si} son las fracciones de humedad en porcentaje y de sólidos iniciales en °Bx, respectivamente. x_{wt} y x_{st} son las fracciones de humedad en porcentaje y de sólidos en °Bx al tiempo t , respectivamente.

Modelo empírico de Azuara

Se basa en el balance de masa para predecir la cinética de la deshidratación durante el proceso osmótico y además determinar el punto de equilibrio final según lo indican las ecuaciones 4 y 6 que representan la forma lineal de las ecuaciones 3 y 5.

$$PH_t = \frac{\beta_1 t (PH_\infty)}{1 + \beta_1 t} \quad (3)$$

$$\frac{t}{PH_t} = \frac{1}{PH_\infty} (t) + \frac{1}{\beta_1 PH_\infty} \quad (4)$$

$$GS_t = \frac{\beta_2 t (GS_\infty)}{1 + \beta_2 t} \quad (5)$$

$$\frac{t}{GS_t} = \frac{1}{GS_\infty} (t) + \frac{1}{\beta_2 GS_\infty} \quad (6)$$

Dónde PH_t es la pérdida de humedad en el tiempo t , PH_∞ es la humedad al tiempo infinito (equilibrio) y β_1 es la constante relacionada con la velocidad de difusión del agua hacia fuera del mango (min^{-1}). GS_t es la ganancia de sólidos en el tiempo t , GS_∞ es la cantidad correspondiente al tiempo infinito (equilibrio) y β_2 es la constante relacionada con la velocidad de difusión de los solutos hacia fuera del mango (min^{-1}).

Modelo Fenomenológico

Para determinar la difusión efectiva (D_{ef}) del agua y el soluto fue aplicado un modelo fenomenológico basado en la segunda ley de Fick para la difusión en estado no estacionario, considerando las láminas de mango como placas planas de longitud infinita. (MC_0), la difusión y la concentración en la interface constantes. El modelo resultante es el que se muestra en las ecuaciones 7 y 8 (Crank, 1975), el cual fue resuelto optimizando la función de los mínimos cuadrados de los errores, con el método de Newton, usando el software Matlab 8.1.

$$W_{AoS} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-D_{ef}(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t \right] \quad (7)$$

$$W_{AoS} = \frac{MC(t) - MC_{eq}}{MC_0 - MC_{eq}} \quad (8)$$

Dónde D_{ef} es el coeficiente difusivo de pérdida de agua o ganancia de soluto, m^2/s ; n es el número de término de la serie, ($n=10$); l es el espesor del mango, m ; t es el tiempo, s ; MC_0 y $MC(t)$ son los contenidos de agua o sólidos al inicio y en el instante de tiempo t , respectivamente; MC_{eq} es la cantidad de agua o sólidos en el equilibrio, que se pueden calcular reemplazando los valores GS^{∞} o PH^{∞} del modelo empírico de Azuara (Ec. 3-6) en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

Para determinar el efecto de la temperatura sobre D_{ef} se utilizó una ecuación tipo Arrhenius, como la que se presenta en la ecuación 9 (Agudelo et al., 2016).

$$\ln(D_{ef}) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT} \quad (9)$$

Donde, D_{ef} es la difusión efectiva para cada temperatura de reacción m^2/s , E_a es la energía de activación (kJ/mol), A es el factor de Arrhenius, R es la constante universal de los gases (8,314J/mol.K) y T es la temperatura en Kelvin (K).

Modelo empírico de Peleg

Peleg (1988) propuso una ecuación para describir las curvas de sorción que se acercan al equilibrio asintóticamente (Park et al., 2002).

$$MC_t = MC_0 \pm \frac{t}{k_1 + k_2} \quad (10)$$

Donde $MC(t)$ es la cantidad de agua o sólidos en un tiempo t , g ; MC_0 es la cantidad inicial de agua o sólidos, g ; t es el tiempo, h ; k_1 y k_2 son las constantes de Peleg (Ec. 10).

Bondad de ajuste

La calidad del ajuste de los modelos se evaluó con un coeficiente de correlación lineal (R^2) y el porcentaje de la media del error relativo (PMER) (Zapata et al., 2014).

$$PMER = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{X_{ei} - X_{ci}}{X_{ei}} \quad (11)$$

Dónde: X_{ei} Es el valor experimental; X_{ci} Es el valor estimado para cada modelo; n Es el número de observaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan dos subsecciones, la primera describe los resultados de la caracterización fisicoquímica del producto en estudio y la segunda hace referencia a los resultados obtenidos en el modelamiento de los parámetros arrojados en la DO.

Análisis fisicoquímicos de la materia prima

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos más importantes del mango fresco, a saber: humedad ($85,05\% \pm 0,05$), °Bx ($10,9 \pm 0,20$), Acidez ($0,68\% \pm 0,12$) y pH ($4,11 \pm 0,88$). Se reporta el promedio tres análisis. *Modelamiento de la cinética de la DO de láminas de mango Tommy Atkins*

De la subsección de modelamiento se derivan tres sub-subsecciones que describen los tres modelos utilizados en la cinética de transferencia de masa durante la DO.

Modelo Empírico de Azuara

Con este modelo se ajustó el comportamiento de GS y PH en función del tiempo. GS es un parámetro importante en DO, porque en algunos casos su incremento es un fenómeno indeseable, puesto que puede estar asociado a modificaciones de las propiedades organolépticas y el contenido calórico del producto (Phisut, 2012), además de que puede favorecer la formación de una barrera en la superficie del producto, afectando negativamente la transferencia de masa en el sistema (Giraldo et al., 2003). Por otro lado, si se busca reducir las pérdidas de peso en el producto para no afectar significativamente su costo, puede ser deseable un elevado GS, como es el caso de los productos confitados (Giraldo et al., 2003). En las figuras 1 y 2, se presenta el comportamiento cinético experimental y predicho por el modelo de Azuara para GS en función del tiempo para 45°Bx y 60°Bx respectivamente, donde se observa como el incremento de la temperatura favorece la GS, debido a que estimula el movimiento molecular y aumenta la permeabilidad celular, de manera que se produce un aumento de la velocidad de transferencia de materia, con lo que la entrada de solutos es mayor (Alakali et al., 2006; Zapata et al., 2011). Mientras que en las tablas 1 y 2 aparecen los parámetros del modelo empírico de Azuara para GS a las dos concentraciones de jarabe mencionadas. Por otro lado al comparar la figura 1 y la figura 2, se observa como el incremento en la concentración del jarabe afecta la GS debido al efecto que la concentración tiene sobre la velocidad transferencia de masa (Alakali et al., 2006; Zapata et al., 2011).

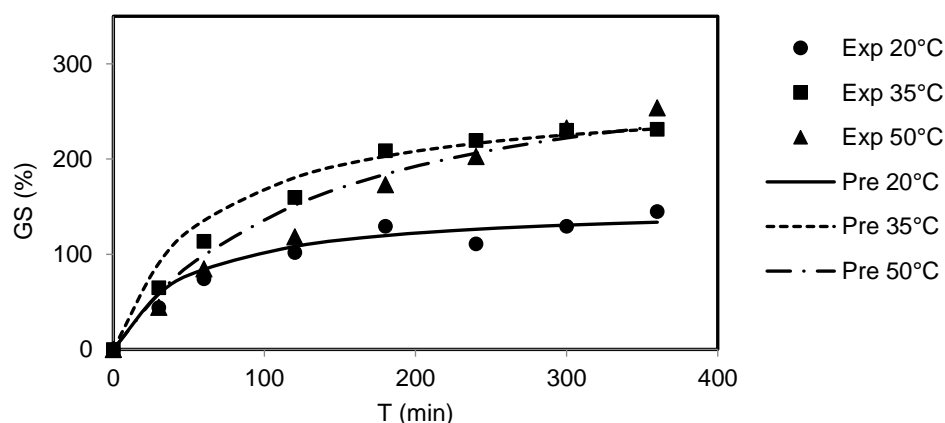


Fig. 1: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Azuara para el GS a 45°Bx.

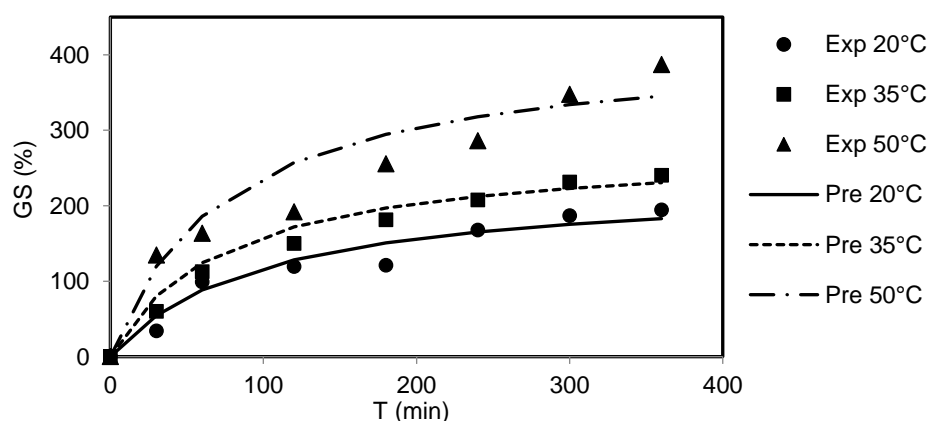


Fig. 2: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Azuara para el GS a 60° Bx.

Al tratarse de un proceso de deshidratación, la salida de agua de la fruta se convierte en una de las más importantes variables. En las figuras 3 y 4, se presenta el comportamiento cinético experimental y predicho por el modelo empírico de Azuara para PH en función del tiempo para 45°Bx y 60°Bx respectivamente, mientras que en las tablas 1 y 2 aparecen los parámetros del modelo empírico de Azuara para PH a las dos concentraciones de jarabe mencionadas. En estas figuras se observa como el incremento de la temperatura favorece también los valores PH, posiblemente por el mismo efecto que se mencionó para GS, asociado al incremento de la permeabilidad celular y el movimiento molecular (Corzo y Bracho, 2004), con lo que la salida de agua es mayor (Alakali et al., 2006). Por otro lado al comparar la figura 3 y la figura 4, se observa como el incremento en la concentración del jarabe afecta la PH debido al efecto que la concentración tiene sobre la velocidad transferencia de masa (Alakali et al., 2006; Zapata et al., 2011).

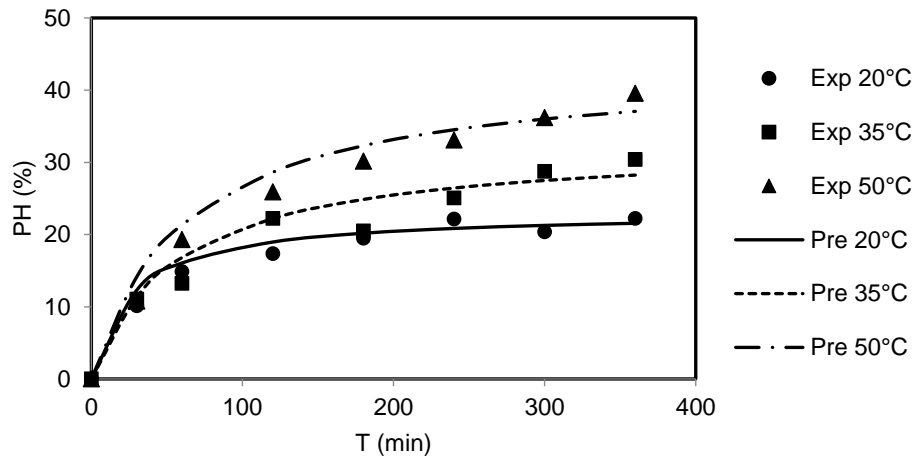


Fig. 3: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Azuara para el PH a 45° Bx.

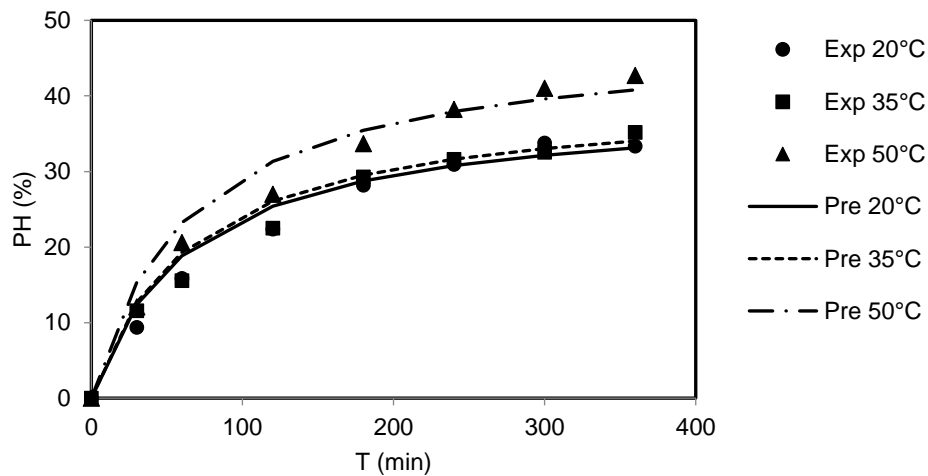


Fig. 4: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Azuara para el PH a 60° Bx.

En las Figuras 1-4 se observa como la entrada de solutos y salida de agua tienen un periodo de mayor velocidad en los primeros 100 min, que es un comportamiento típico en la DO de mango (Alakali et al., 2006; Zapata et al., 2011), después de lo cual el proceso se ralentiza reduciendo cada vez más la velocidad con el tiempo. Esto se puede explicar si se tiene en cuenta que en los primeros momentos de la DO existen diferencias en el potencial químico de las especies que participan en el sistema entre el interior y exterior de la fruta. El interior de la fruta posee un mayor potencial químico del agua y menor potencial químico de solutos, que la solución en el exterior. Estas diferencias impulsan el movimiento de solutos hacia adentro y de agua hacia afuera de la fruta (Ozdemir et al., 2008). A medida que transcurre el tiempo del proceso, la entrada y salida de sustancias hace que las diferencias en potenciales químicos se reduzcan, haciendo que el sistema se aproxime cada vez más al equilibrio, con lo que la entrada y salida de materia disminuye paulatinamente hasta acercarse a cero, puesto que se reduce la fuerza motriz que impulsa la transferencia de masa (Ozdemir et al., 2008).

Con la salida de agua se reduce el peso, la humedad y el Aw, mientras que se incrementan los sólidos del producto, es decir se incrementan todos los parámetros cinéticos (PH y GS). Con la entrada de solutos se incrementa el peso y los sólidos, pero se reduce el Aw y la humedad, o sea que se incrementan ambos

parámetros. Al principio del proceso la alta salida de agua, predomina sobre la entrada de solutos, con lo que se promueve incrementos en los dos parámetros y al final del proceso tanto la entrada como la salida de material, virtualmente se detiene porque el sistema se aproxima al equilibrio y por ende los parámetros cinéticos se mantienen en torno a un cierto valor. Los altos valores de los parámetros cinéticos son convenientes para la conservación de la fruta, porque ambos están asociados con la reducción del agua disponible para el desarrollo de microorganismos y reacciones enzimáticas que puedan deteriorar el producto (Giraldo et al., 2005).

Tabla 1: Parámetros del modelo empírico de Azuara para el PH y el GS en la DO de láminas de mango Tommy Atkins a 45°Bx.

T (°C)	Parámetro GS				Parámetro PH			
	GS ∞ (%)	β_1 (min $^{-1}$)	MRPE	R 2	PH ∞ (%)	β_1 (min $^{-1}$)	MRPE	R 2
20	151,52	0,02	10,16	0,79	23,15	0,04	6,91	0,80
35	270,27	0,08	9,76	0,83	32,68	0,02	8,47	0,86
50	322,58	0,01	12,15	0,96	43,48	0,02	8,78	0,87

Tabla 2: Parámetros del modelo empírico de Azuara para la PH y GS en la DO de láminas de mango Tommy Atkins a 60°Bx

T (°C)	Parámetros GS				Parámetros PH			
	GS ∞ (%)	β_1 (min $^{-1}$)	MRPE	R 2	PH ∞ (%)	β_1 (min $^{-1}$)	MRPE	R 2
20	232,56	0,01	14,41	0,89	39,06	0,01	9,18	0,88
35	277,78	0,01	9,77	0,89	40,16	0,01	12,88	0,88
50	416,67	0,01	12,52	0,92	48,54	0,01	8,78	0,86

Al analizar los resultados de las tablas 1 y 2, se observa que el incremento de la temperatura aumenta los valores del parámetro GS ∞ . En ambos niveles de °Bx, este parámetro aumentan con la temperatura, porque está vinculado con la cantidad de sólidos que ingresan al producto cuando el sistema alcanza el equilibrio, lo cual indica que la cantidad de sólidos que ingresan al producto se ve favorecido con la temperatura, pero además se ve favorecido con el incremento en °Bx, debido al efecto que tanto la temperatura como el gradiente de concentración tiene sobre la transferencia de masa de sólidos en solución (Alakali et al., 2006; Corzo y Bracho, 2004). Del mismo modo, en las tablas 1 y 2, se observa que el incremento de la temperatura aumenta PH ∞ . En ambos niveles de °Bx, este parámetro se incrementa con el aumento de temperatura, porque está vinculado con la cantidad de agua que permanece en el producto cuando el sistema alcanza el equilibrio, lo cual indica que la cantidad de agua que retiene el producto se ve reducido con el incremento de temperatura, este efecto es más marcado con el incremento en °Bx, debido al efecto que tanto la temperatura como el gradiente de concentración tiene sobre la transferencia de masa en estos procesos (Alakali et al., 2006; Corzo y Bracho, 2004).

Modelo empírico de Peleg

En las figuras 5 y 6, se presenta el comportamiento de los sólidos solubles (SS) en función del tiempo a los dos niveles de °Bx de trabajo (45 y 60%), para los datos experimentales y predichos por el modelo empírico de Peleg. Mientras que las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento de la humedad (H) en función del tiempo para las mismas condiciones de temperatura y concentración, experimentales y predichas por el mismo modelo.

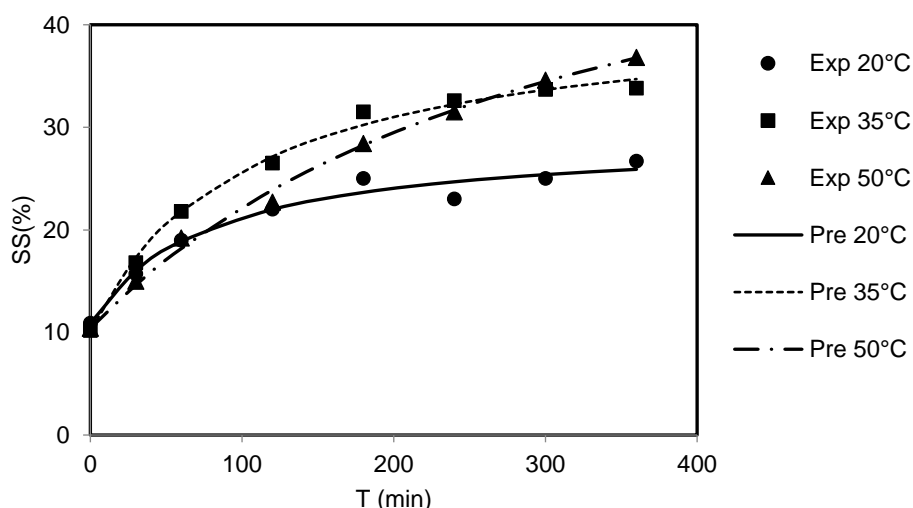


Fig. 5: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Peleg para los SS a 45°Bx.

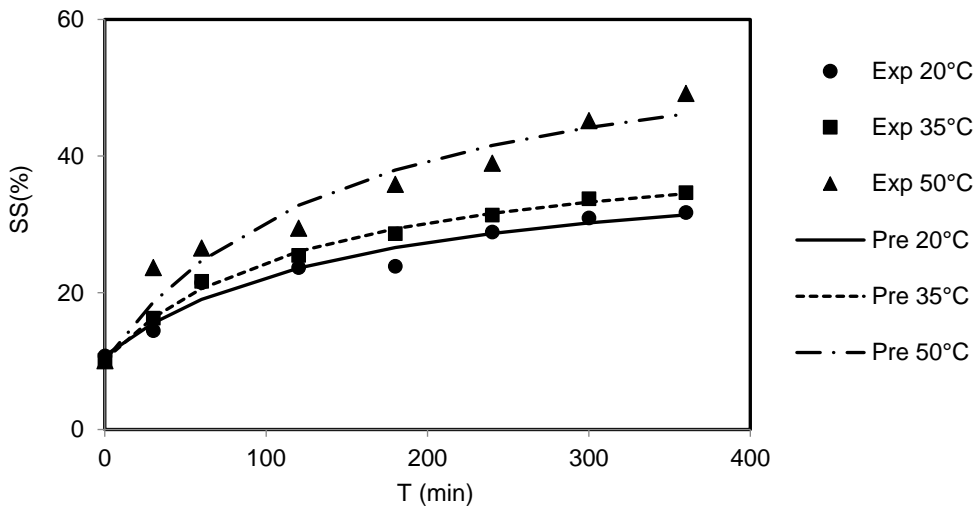


Fig. 6: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Peleg para los SS a 60°Bx.

Se observa como la temperatura y la concentración de la solución osmódeshidratante tienen efecto sobre SS y H, siendo mayor la cantidad de sólidos que ingresa a la fruta y menor la humedad, a mayor temperatura y concentración de la solución, lo cual se puede explicar como ya se mencionó gracias al efecto que tanto la temperatura y el gradiente de concentración tienen sobre la transferencia de masa en este proceso (Alakali et al., 2006; Corzo y Bracho, 2004).

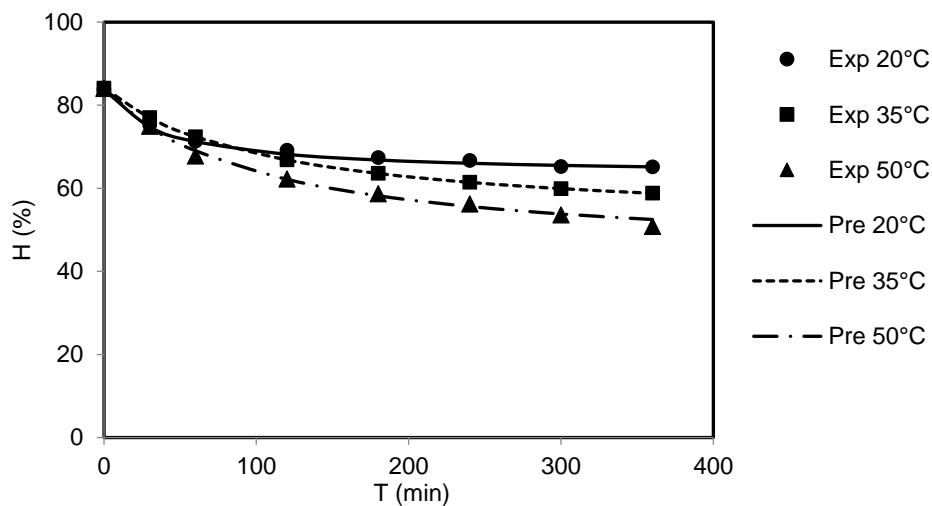


Fig. 7: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Peleg para el H a 45°Bx.

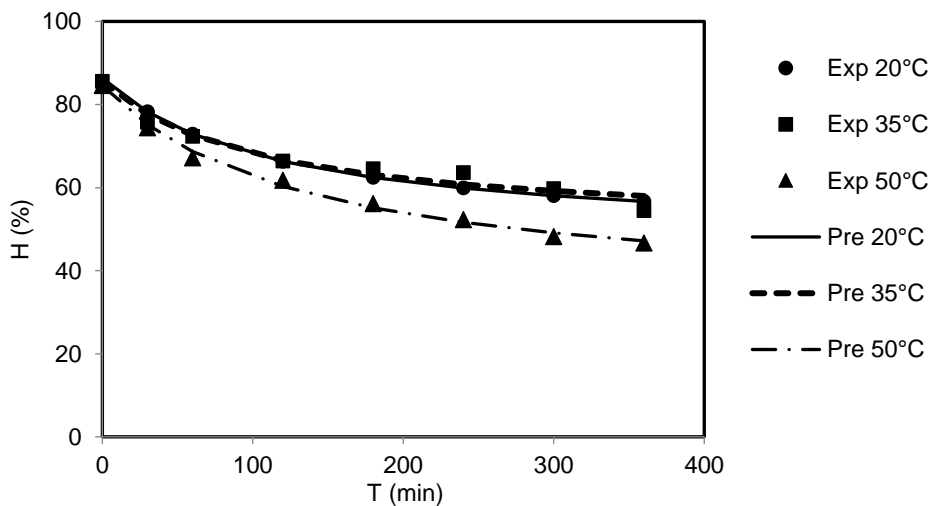


Fig. 8: Cinética de DO predicha por el modelo empírico de Peleg para el H a 60°Bx.

En las tablas 3 y 4 se observan los valores de los parámetros del modelo empírico de Peleg (Ec. 10), determinados a partir de los valores experimentales que se presentan en las figuras 5-8. Así mismo dichos parámetros se utilizaron para predecir el comportamiento de SS y H que se presentan en las mismas figuras, los cuales entregaron los valores del R^2 y MRPE que se indican en las tablas 3 y 4 las cuales señalan la bondad de ajuste obtenida para las dos variables en las condiciones de temperatura y concentración de la solución trabajada.

Tabla 3: Parámetros del modelo empírico de Peleg para el H y SS en la DO de láminas de mango Tommy Atkins a 45°Bx.

T (°C)	SS				H			
	k1	k2	R ² ajustado	MRPE	k1	k2	R ² ajustado	MRPE
20	4,23E+00	5,49E-02	0,97	0,95	1,90E+00	4,86E-02	0,99	0,32
35	3,28E+00	3,17E-02	0,99	1,03	3,31E+00	3,03E-02	0,98	0,53
50	6,52E+00	1,98E-02	0,99	1,69	2,53E+00	2,47E-02	0,99	0,74

Tabla 4: Parámetros del modelo empírico de Peleg para el H y SS en la DO de láminas de mango Tommy Atkins a 60°Bx.

T (°C)	SS				H			
	k1	k2	R ² ajustado	MRPE	k1	k2	R ² ajustado	MRPE
20	5,27E+00	3,39E-02	0,95	2,87	2,93E+00	2,56E-02	0,99	0,55
35	3,94E+00	3,02E-02	0,99	1,23	2,93E+00	2,81E-02	0,95	1,36
50	2,94E+00	1,96E-02	0,94	6,08	2,61E+00	1,95E-02	0,99	1,11

Modelo Fenomenológico

En la tabla 5 se muestran los valores de D_{ef} para SS y H calculados con el modelo de la solución de la segunda ley de Fick (Ec. 7-8), así como las E_a determinadas con la ecuación 9. Los valores de D_{ef} obtenidos están por encima de los reportados por Giraldo et al. (2003), quienes trabajaron a 30°C y 35-65°Bx. Es interesante observar cómo los D_{ef} obtenidos a 45°Bx son superiores a los de 60°Bx, a pesar de tener un gradiente de concentración de soluto mayor. Este comportamiento se debe a que la solución más diluida puede penetrar mejor al interior de los tejidos, en contraste con las soluciones concentradas que son más viscosas y pueden llegar a formar una capa de sacarosa superficial, obstaculizando la entrada de los solutos y la salida de agua. Esta película posee un espesor mayor entre mayor sea la concentración de sacarosa en la solución, lo cual ha sido observado por otros autores (Giraldo, 2003).

Por otro lado, para una concentración de solución osmótica constante el coeficiente D_{ef} tiene una dependencia con la temperatura del tipo de Arrhenius (Della, 2010), lo cual se puede corroborar a partir de los valores de R^2 obtenidos en este caso. Sin embargo, llama la atención el signo negativo de E_a para los ensayos desarrollados a 45°Bx, tanto para SS como para H, lo cual no es común en este tipo de procesos, aunque si puede ocurrir en reacciones con un cierto nivel de complejidad (Greenwald et al., 2005). Independientemente de esto, los incrementos en la concentración de solutos han sido asociados con incrementos en la energía de activación (Ciużyńska et al., 2016), como se observa en este caso.

Al comparar los valores de los R^2 y de MRPE, así como el comportamiento gráfico de los valores experimentales vs los predichos, para los modelos de Azuara, fenomenológico y Peleg, es claro que el mejor ajuste lo entrega el modelo empírico de Peleg, seguida por el modelo fenomenológico y luego el de Azuara. Sin embargo se debe tener en consideración que el modelo de Peleg, por ser un modelo empírico no permite profundizar en el entendimiento fenomenológico del proceso, mientras que los otros dos modelos si lo hacen, lo cual es de gran utilidad cuando se quieren extrapolar resultados y escalar procesos. De todas formas el excelente ajuste obtenido con el modelo de Peleg, permite apreciar la aplicación de este modelo en este tipo de procesos y ofrece información valiosa para quien pretenda utilizar las condiciones establecidas en este trabajo, para desarrollos futuros.

Tabla 5: Valores de los parámetros para el modelo fenomenológico basado en la segunda ley de Fick el valor de la energía de activación para SS y H.

45 °Bx										
T (°C)	Parámetros SS					Parámetros H				
	MC _{eq}	D _{ef}	MRPE	E _a (KJ/mol)	R ²	MC _{eq}	D _{ef}	MRPE	E _a (KJ/mol)	R ²
20	27,42	1,87E-08	25,57	-23,76	0,91	64,34	2,74E-08	19,30	-16,61	0,91
35	37,77	1,49E-08	10,70			56,67	1,66E-08	13,94		
50	43,95	7,47E-09	13,26			47,48	1,46E-08	7,05		
60 °Bx										
T (°C)	Parámetros SS					Parámetros H				
	MC _{eq}	D _{ef}	MRPE	E _a (KJ/mol)	R ²	MC _{eq}	D _{ef}	MRPE	E _a (KJ/mol)	R ²
20	35,92	1,09E-08	12,08	5,74	0,95	52,59	1,40E-08	9,40	1,89	0,95
35	38,53	1,27E-08	5,53			51,20	1,43E-08	5,68		
50	52,18	1,35E-08	19,86			43,50	1,50E-08	8,58		

CONCLUSIONES

Basado en el estudio realizado se pueden obtener las siguientes conclusiones principales: (i) La deshidratación osmótica del mango (*Mangifera indica L.*) var. Tomy Atkins en láminas depende de la concentración del jarabe usado y de la temperatura del proceso; (ii) En términos generales la transferencia de agua y de sólidos solubles, se ve favorecida por el incremento en la concentración del jarabe y la temperatura; y (iii) El comportamiento del proceso de deshidratación puede ser modelado en función del tiempo y la temperatura, tanto con modelos empíricos, como fenomenológicos; (iv) Los coeficientes de difusión efectiva a 60°Bx dependen de la temperatura siguiendo un comportamiento tipo Arrhenius; (v) El modelo de Peleg ajusta mejor que el modelo empírico de Azuara y el modelo fenomenológico derivado de la ley de Fick, bajo las condiciones de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo dan las gracias a la Universidad de Antioquia, por el apoyo financiero entregado para la realización de este trabajo a través de la estrategia de Sostenibilidad 2014-2015 del CODI.

REFERENCIAS

- Abbasi-Souraki, B., H.Tondro y M. Ghavami, Modeling of mass transfer during osmotic dehydration of apple using an enhanced lumped model, doi: 10.1080/07373937.2012.749890, Drying Technology (en línea), 31(5), 595–604 (2013)
- Agudelo, C., C. Restrepo y J. E. Zapata, Respiration kinetic of mango (*Mangifera indica L.*) as function of storage temperature, doi: <http://dx.doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59143>, Revista Facultad Nacional de Agronomía (en línea), 69(2), 7985-7995 (2016)
- Alakali, J., C. Ariahu y N. Nkpa, Kinetics of Osmotic Dehydration of Mango, doi: 10.1111/j.1745-4549.2006.00080.x, Journal of Food Processing and Preservation (en línea), 30(5), 597-607 (2006)
- AOAC, 934.06, Official Methods of Analysis, 14th edition, Gaithersburg, Estados Unidos (1984)
- Azuara, E., C. I. Beristain y H. S. García, Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration, International Journal of Food Science and Technology, 29 (4), 239-242 (1992)
- Ciurzyńska, A., H. Kowalska, K. Czajkowska y A. Lenart, Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food, doi:10.1016/j.tifs.2016.01.017, Trends in Food Science & Technology (en línea), 50, 186-192 (2016)

- Corzo, O. y N. Bracho, Effects of brine concentration and temperature on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of sardine sheets, doi:10.1016/j.lwt.2003.11.004, LWT - Food Science and Technology (en línea), 37(4), 475–479 (2004)
- Crank J., The mathematics of diffusion, 1st Edition, Clarendon Press, U.K. (1975)
- Da Conceição Silva, M.A., Z.E. Da Silva, V.C. Mariani y S. Darche, Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry, doi:10.1016/j.lwt.2011.07.032, LWT - Food Science and Technology (en línea), 45(2), 246–252 (2012)
- Della, P., Secado de alimentos por métodos combinados: Deshidratación osmótica y secado por microondas y aire caliente, MSc. Tecnología de los Alimentos, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (Argentina): Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, 17-18 (2010)
- Giraldo, G., P. Talens, P. Fito y A. Chiralt, Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango, doi:10.1016/S0260-8774(02)00331-X, Journal of Food Engineering (en línea), 58 (1), 33-43 (2003)
- Giraldo, G. A., A. L. Duque y C. L. García, Metodos combinados de secado para el escarchado de mango (Mangifera indica) var. Kent, Vitae ISSN: 0121-4004, <https://goo.gl/8a2PNd>, acceso 9 de febrero de 2016, 12(2), 5-12 (2005)
- Greenwald, E. E., S. W. North, Y. Georgievskii y S. J. Klippenstein, A two transition state model for radical-molecule reactions: A case study of the addition of OH to C₂H₄, doi: 10.1021/jp058041a, The Journal of Physical Chemistry A (en línea), 109(27), 6031-6044 (2005)
- Herman, E., C.E. Martínez, H. Pacheco, R., Carmona, H. Ruiz y I.I. Ruiz, Mass transfer modeling of equilibrium and dynamic periods during osmotic dehydration of radish in NaCl solutions, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2012.10.001>, Food Bioproducts Process (en línea), 91(3), 216–224 (2013)
- ICONTEC, NTC-5210, Frutas frescas. Mango. Variedades mejoradas. Especificaciones, 1-33, Bogotá, Colombia (2003)
- Lewicki, P. P. y A. Lenart, Osmotic dehydration of fruits and vegetables. In: Mujumdar, A.S. (Ed.), Handbook of Industrial Drying, 4th edition, CRC Press, 661–674, Warsaw (2015)
- Ozdemir, M., B. Ozen, L. Dock y J. Floros, Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology, doi:10.1016/j.lwt.2008.01.010, LWT - Food Science and Technology (en línea), 41(10), 2044-2050 (2008)
- Park, K. J., Bin, A., Brod, F. P. R., y Park, T. H. K. B., Osmotic dehydration of pear Danjou (Pyrus communis L.) doi:10.1016/S0260-8774(01)00118-2, Journal of Food Engineering (en línea), 52, 293–298 (2002)
- Peleg, M, An empirical model for the description of moisture sorption curves, Journal Food Science, 53 (4), 1216-1219 (1988)
- Phisut, N., Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits, International Food Research Journal, ISSN: 2231-7546, <https://goo.gl/CMHzBY>, acceso 4 de enero de 2016, 19(1), 7-18 (2012)
- Reyes, G., O. Corzo, N. Bracho e Y. Rodríguez, Optimización de la deshidratación osmótica con pulso de vacío de láminas de sardinas, Revista Científica, ISSN: 0798-2259, <https://goo.gl/zQHddF>, acceso 4 de enero de 2016, 18(3), 320-328 (2008)
- Ruiz, I. I., R. I. Castillo, M.A. Salgado, G.C. Rodríguez y M.A. García, Mass transfer modeling during osmotic dehydration of hexahedral pineapple slices in limited volume solutions, doi:10.1007/s11947-008-0102-x, Food and Bioprocess Technology (en línea), 3(3), 427–433 (2010)
- Sareban, M. y B. Abbasi Souraki, Anisotropic diffusion during osmotic dehydration of celery stalks in salt solution, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2016.01.005>, Food and bioproducts processing (en línea), 98, 161–172 (2016)
- Sharma, R.R., D. Singh y R. Singh, Biological control of postharvest diseases of fruits and vegetables by microbial antagonists: A review, doi:10.1016/j.biocontrol.2009.05.001, Biological Control (en línea), 50(3), 205-221 (2009)

Soliva-Fortuny, R.C. y O. Martín-Belloso, New advances in extending the shelflife of fresh-cut fruits: a review, doi:10.1016/S0924-2244(03)00054-2, Trends in Food Science and Technology (en línea), 14(9), 341-353 (2003)

Toivonen, P. M. A. y D. A. Brummell, Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables, doi:10.1016/j.postharvbio.2007.09.004, Postharvest Biology and Technology (en línea), 48(1), 1-14 (2008)

Torres, J.D., P. Talens, J.M. Carot, A. Chiralt y I. Escriche, Volatile profile of mango (*Mangifera indica* L.), as affected by osmotic dehydration, doi:10.1016/j.foodchem.2006.01.020, Food Chemistry (en línea), 101(1), 219-228 (2007)

Tsamoa, C.V.P., A.F. Bilamea, R. Ndjouenkeu y Y.J. Nono, Study of material transfer during osmotic dehydration of onion slices (*Allium cepa*) and tomato fruits (*Lycopersicon esculentum*), doi:10.1016/j.lwt.2004.07.015, LWT - Food Science and Technology (en línea), 38(5), 495–500 (2005)

Zapata, J. E., A. Arias y G. Ciro, Optimization of osmotic dehydration of pineapple (*Ananas comosus* L.) using the response surface methodology, *Agronomía Colombiana*, ISSN: 2357-34, <https://goo.gl/E2ZQ9y>, acceso: 11 de febrero de 2016, 29 (2), 249-256 (2011)

Zapata J.E., O.A. Quintero y L.D. Porras, Sorption Isotherms for Oat Flakes (*Avena sativa* L.), doi: 10.15446/agron.colomb.v32n1.40652, *Agronomía Colombiana* (en línea), 32(1), 52-58 (2014)