

**EFFECTO DE LA PROTEÍNA DE SUERO DE LECHE-SACAROSA EN LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE MANZANA****EFFECT OF WHEY PROTEIN-SUCROSE IN THE OSMOTIC DEHYDRATION OF APPLE**E. Flores-Andrade<sup>1</sup>, L.A. Pascual-Pineda<sup>2</sup>, M. Jiménez<sup>3</sup> y C.I. Beristain<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana. Prolongación Oriente 6, Orizaba, Veracruz, C. P. 94340, México.<sup>2</sup>Unidad de Servicios de Apoyo de Resolución Analítica (SARA), Universidad Veracruzana, Av. Dr. Rafael Sánchez Altamirano s/n, Col. Industrial-Animas, Apdo. Postal 575, Xalapa, Veracruz., 91000, México.<sup>3</sup>Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Veracruzana, Av. Dr. Rafael Sánchez Altamirano s/n, Col. Industrial-Animas, Apdo. Postal 575, Xalapa, Veracruz., 91000, México.

Recibido 15 de Julio de 2013; Aceptado 17 de Octubre de 2013

**Resumen**

Se estudió la transferencia de masa en placas de manzana en mezclas acuosas de sacarosa-concentrado de proteína de suero (WPC) de leche a 40°C, para lo cual se prepararon mezclas de WPC:sacarosa a diferentes proporciones y tiempos de inmersión de hasta 400 min, se determinó la actividad de agua ( $a_w$ ) y se calculó la presión osmótica de las soluciones. Los datos experimentales de pérdida de masa ( $ML$ ), pérdida de agua ( $WL$ ) y ganancia de sólidos ( $SG$ ) fueron determinados y calculados los coeficientes de difusión aparente del agua ( $D_w$ ). Los resultados mostraron que las  $a_w$  de las mezclas se encontraron en el rango de 0.947-0.998; mientras que los coeficientes de difusión  $D_w$  promedio en el de  $1.16$  a  $2.32 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Se observó que a menor cantidad de sacarosa y mayor WPC los valores de pérdida de masa en el equilibrio ( $ML_{\infty}$ ), la pérdida de agua en el equilibrio ( $WL_{\infty}$ ) y la difusión ( $D_w$ ) disminuyeron. Cuando se usaron proporciones de 2:3 y 3:2 WPC-sacarosa se presentó una resistencia al flujo a la transferencia de masa, lo cual posiblemente se debió a la formación de una membrana líquida de biopolímero alrededor de la placa de manzana.

*Palabras clave:* mezclas, transferencia de masa, actividad de agua, proteína de suero de leche.

**Abstract**

The mass transfer of sliced apple in aqueous mixtures of sucrose-whey protein concentrate (WPC) at 40°C was studied. WPC:sucrose mixtures in different ratios and immersion times of up to 400 minutes were prepared. Water activity ( $a_w$ ) was determined and osmotic pressure in aqueous solutions was calculated. The experimental data of mass loss ( $ML$ ), water loss ( $WL$ ) and solid gain ( $SG$ ) of apple slices were determined. The apparent diffusion coefficients of water ( $D_w$ ) were calculated. The results showed that the  $a_w$  of the mixtures ranged from 0.947 to 0.998; whereas the average diffusion coefficients of water ( $D_w$ ) varied from 1.16 to  $2.32 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. It was observed that the lesser the quantity of sucrose and the bigger the WPC, mass loss in the equilibrium ( $ML_{\infty}$ ), water loss in the equilibrium ( $WL_{\infty}$ ) and  $D_w$  parameters decreased. When used 2:3 and 3:2 protein-sucrose solutions there was a flux resistance to mass, because it is likely to be formed a liquid membrane of biopolymer around the apple.

*Keywords:* mixtures, mass transfer, water activity, whey protein.

**1 Introducción**

La deshidratación osmótica es una operación de transferencia de masa frecuentemente utilizada como pretratamiento para disminuir el contenido de humedad y

la actividad de agua ( $a_w$ ) de un alimento, o como método para incorporar ingredientes fisiológicamente activos y así obtener productos con mejores propiedades organolépticas, nutritivas y/o funcionales (Bellary y col., 2011; Silva y col., 2013). Durante el proceso osmótico, existe flujo de

\*Autor para la correspondencia. E-mail: cberistain@uv.mx Tel.: (228) 841 89 00, Fax (228) 841 89 32

agua del producto hacia la solución mientras que el agente osmótico es transferido hacia el interior del producto. De acuerdo a las características deseadas del producto final, el balance entre la deshidratación e impregnación puede modificarse mediante el control de factores tales como la temperatura, tamaño y geometría de la muestra, relación fruta: solución, nivel de agitación, nivel de vacío, así como la concentración y naturaleza del agente osmótico en la solución hipertónica, el efecto de estas variables sobre la velocidad de transferencia de masa han sido estudiadas por Mújica-Paz y col. (2003), Singh y col. (2010), Ganjloo y col. (2011), Phisut (2012), etc.

La selección del agente osmótico es muy importante ya que influye en la velocidad de transferencia de masa y está relacionada con la modificación de las propiedades organolépticas y nutritivas del producto final. En relación al efecto de los agentes osmóticos en la transferencia de masa se ha estudiado para sacarosa, glucosa, fructosa, sorbitol, hidrolizados de almidón, fructo-oligosacáridos y sales de calcio (Lazarides y col., 1995; Dermesonlouoglou y col., 2008; Matusek y col., 2008; Ispir y Togrul, 2009; Mavroudis y col., 2012); la entrada de sólidos en el tejido está en función de la concentración en la solución y de su peso molecular (Phisut, 2012). Otra variable que interviene en la transferencia de masa en la deshidratación osmótica de productos es la viscosidad que depende de los agentes osmóticos utilizados, El-Aour y col. (2006) estudiaron la influencia de la viscosidad de la solución con sacarosa, fructuosa y sólidos de jarabe de maíz en la transferencia de masa. Otros autores han analizado la influencia del peso molecular y de la viscosidad en albaricoque, encontrando que usando como agente osmótico la maltodextrina se obtiene una mayor ganancia de sólidos en comparación con la fructosa que es de menor peso molecular, lo que depende también de la microestructura de la fruta (Ispir y Togrul, 2009). Sin duda alguna, el agente osmótico más estudiado y recomendado es la sacarosa, ya que reduce el oscurecimiento enzimático y la pérdida de aromas (Qi y col., 1998), la limitación principal de este agente es el sabor dulce que imparte y que modifica el sabor del producto final, por lo que se recomienda utilizar mezclas de sacarosa y pequeñas cantidades de cloruro de sodio, ya que este último reduce la actividad de agua de la solución y por lo tanto incrementa la transferencia de masa (Bekele y Ramaswamy, 2010; Singh y col., 2010; Yadav y Singh, 2012). Existen pocos reportes sobre la utilización de mezclas de sacarosa con biopolímeros y el efecto de las mezclas en la transferencia de masa durante el tratamiento osmótico de frutas y vegetales. En el presente estudio se utilizó concentrado de proteína de suero de leche, el cual contiene aminoácidos esenciales, que influyen en la regulación del metabolismo de las proteínas en el cuerpo humano (Archibald, 2002). Las propiedades fisicoquímicas de WPC que tiene como principal constituyente a la  $\beta$ -lactoglobulina que es rica en cisteína, permiten la formación de membranas líquidas y la obtención de productos funcionales (Archibald, 2002;

Dangaran y Tomasula, 2009). De la información reportada a la fecha no se encontró ningún trabajo sobre el uso de las proteínas como agentes osmóticos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de mezclas acuosas de concentrado de proteína de suero de leche-sacarosa, sobre la pérdida de agua y ganancia de sólidos en placas de manzana.

## 2 Materiales and métodos

### 2.1 Materiales

Se usó concentrado de proteína de suero de leche (WPC) con un contenido de 82% de proteína, 6% lactosa, 8% de lípidos y 4% de cenizas, el cual fue adquirido en Amfher Foods (Ciudad de México). Las manzanas, de la variedad Golden delicious, y azúcar refinada fueron comprados en un supermercado local.

### 2.2 Preparación de las mezclas acuosas

Se prepararon mezclas acuosas de concentrado de proteína de suero de leche y sacarosa del 10 al 50% de sólidos (p/p) con relaciones en masa de 0:5, 1:4, 2:3, 3:2 y 4:1 WPC:sacarosa ( $X_{wpc}:X_s$ ). Estas soluciones fueron mantenidas a 40°C en baño maría hasta su utilización.

### 2.3 Medición de la actividad de agua de las soluciones y cálculo de la presión osmótica

La actividad de agua ( $a_w$ ) de soluciones preparadas de sacarosa, WPC y sus mezclas en concentraciones de 10, 20, 30, 40 y 50 % (p/p), fue determinada con un medidor de  $a_w$  (Aqualab Serie 3, USA) con una precisión de  $\pm 0.003$ . Se calculó la presión osmótica ( $\varphi$ ) de las soluciones usando la Ec. (1) (Lewicki y Lenart, 1995):

$$\varphi = -\frac{RT}{V} \ln a_w \quad (1)$$

### 2.4 Tratamiento osmótico

Se utilizaron placas de manzana de 36 mm de diámetro y 3.5 mm de grosor, de un peso promedio de  $3.5 \pm 0.18$  g, que se sumergieron en la solución osmótica. El promedio de humedad inicial de las placas de manzana fue de 84.6% (b.h.). Cada placa fue sumergida en una solución osmótica a 40°C, manteniendo una relación en masa de 1:20 fruta-solución. Las muestras fueron removidas de la solución a los 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360 y 400 minutos y se eliminó el exceso de solución con papel desecante para posteriormente ser pesadas. El contenido de humedad de las muestras fue determinado en estufa a vacío a 60°C por 24 h.

## 2.5 Cálculo de la pérdida de masa, pérdida de agua y ganancia de sólidos

Los cálculos de la pérdida de masa ( $ML$ ), pérdida de agua ( $WL$ ) y ganancia de sólidos ( $SG$ ) en las placas de manzana respecto a su masa inicial ( $M_0$ ), durante la deshidratación osmótica, fueron hechos utilizando el método gravimétrico de acuerdo con las Ecs. (2)-(4) (Beristain y col., 1990):

$$ML = \frac{M_0 - M_t}{M_0} = \frac{WL - SG}{M_0} \quad (2)$$

$$WL = \frac{M_0 C_0 - M_t C_t}{M_0} \quad (3)$$

$$SG = \frac{M_0(C_0 - 1) - M_t(C_t - 1)}{M_0} \quad (4)$$

Todas las mediciones fueron realizadas por triplicado y el valor promedio fue utilizado para los ajustes con los modelos cinéticos y cálculo de los coeficientes de difusión del agua.

## 2.6 Modelos cinéticos y cálculo de los coeficientes de difusión

La cinética de  $ML$ ,  $WL$  y  $SG$  en las placas de manzana durante la deshidratación osmótica fue modelada de acuerdo con las Ecs. (5)-(7) de dos parámetros desarrollados por Azuara y col. (1992):

$$ML = \frac{S_0 t ML_\infty}{1 + S_0 t} \quad (5)$$

$$WL = \frac{S_1 t WL_\infty}{1 + S_1 t} \quad (6)$$

$$SG = \frac{S_2 t SG_\infty}{1 + S_2 t} \quad (7)$$

Los coeficientes aparentes de difusión del agua a diferentes tiempos del tratamiento osmótico fueron calculados a partir de los datos de  $WL$  utilizando el modelo de Azuara y col. (1992) para alimentos en forma de placa:

$$D_t = \frac{\pi^2}{4t} \left[ \left( \frac{S_1 t}{1 + S_1 t} \right) \left( \frac{WL_\infty^{mod}}{WL_\infty^{exp}} \right) \right]^2 \quad (8)$$

Los parámetros cinéticos  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  y de equilibrio  $ML_\infty$ ,  $WL_\infty$ ,  $SG_\infty$ , de las Ecs. (5)-(7), fueron obtenidos mediante regresión no lineal utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt implementado en el software KaleidaGraph 4.1 (Synergy, USA).

## 3 Resultados y discusión

### 3.1 Actividad de agua de las mezclas de WPC:sacarosa

En la Fig. 1 se muestra el efecto de la concentración en la actividad de agua de las soluciones acuosas de sacarosa y

concentrado de proteína de suero de leche; se aprecia una disminución de la actividad de agua de 0.989 a 0.943 al incrementarse la concentración del 10 al 50 % en la solución de sacarosa. Un aumento de la concentración en la solución osmótica, da como resultado un incremento en los gradientes de presión osmótica (Fig. 3) y, por lo tanto, podría esperarse una mayor transferencia de masa (Mújica-Paz y col., 2003; Ispir y Togrul, 2009). En las soluciones de concentrado de proteína de suero de leche las  $a_w$  fueron mayores a 0.99, esta elevada actividad de agua se debe a que la proteína presente no influye en su disminución debido a su tamaño molecular promedio de 3.7 nm (de Wit 1998) y a su alta capacidad de retención de moléculas de agua con débiles energías de interacción (Rahman, 1995); la disminución de  $a_w$  de las soluciones de WPC se debe al 6% de lactosa contenida en el WPC. En la Fig. 2 se observa el efecto de la concentración de los solutos en las actividades de agua para las soluciones acuosas a diferentes proporciones WPC:sacarosa, también se aprecia que a mayor contenido de sacarosa disminuye el  $a_w$  de las soluciones. Las menores  $a_w$  se obtuvieron a 50% de concentración y oscilaron entre 0.947 y 0.979, siendo menores que las actividades de agua de las soluciones de sacarosa o WPC como se puede observar en la Fig. 1; con la combinación de estos solutos se obtienen actividades de agua menores a las de las soluciones individuales, lo cual es resultado de un efecto sinérgico de los bajos pesos moleculares de la sacarosa y de la lactosa presente en el concentrado de proteína de suero de leche, que proporcionaron arreglos estructurales e interacciones soluto-soluto, ya que se ha reportado que estos factores influyen en la  $a_w$  de las soluciones acuosas (Rahman, 1995; Lewicki, 2009). El efecto de las  $a_w$  de las mezclas al 50% de sólidos sobre las placas de manzana fue determinado a los 180 min de tratamiento osmótico (Fig. 2); las  $a_w$  de las manzanas fueron cercanas a las  $a_w$  de las mezclas acuosas indicando que los sistemas se aproximaron a un estado de pseudoequilibrio; para la mezcla 4:1 se presentó una  $a_w$  de 0.979 que es similar a la de la manzana fresca ( $a_w = 0.980$ ), por lo que se esperaría una menor transferencia de masa entre la fruta y el medio.

En la Fig. 3 se observa que la presión osmótica es mayor para la sacarosa que para el concentrado de proteína de suero de leche y que se incrementa a mayor concentración de solutos en la solución, lo que se debe al menor peso molecular de la sacarosa en comparación con WPC. La Fig. 4 muestra el efecto de la concentración de las mezclas  $X_{wpc}:X_s$  en la presión osmótica de la solución, se aprecia que las mezclas de estos solutos tienen un efecto sinérgico incrementando la presión osmótica y disminuyendo el  $a_w$ . Se observa que existe un incremento lineal cuando aumenta el contenido de sacarosa, en todo el rango de concentraciones considerado, los parámetros de las ecuaciones lineales y la bondad del ajuste se presentan en la Tabla 1. Esta relación lineal también fue encontrada para soluciones de sacarosa en concentraciones de 44 a 55 (p/p) por El-Aouar y col. (2006) y para cloruro de sodio de 5 a 15% (p/p) y glicerol

de 5 a 40% (p/p) (Lewicki y Lenart, 1995). A mayor concentración de la solución existe mayor presión osmótica y por lo tanto incrementa la pendiente en las ecuaciones lineales. De la Fig. 4 también se obtienen las equivalencias entre las cantidades de una mezcla y la concentración de una solución de sacarosa a la misma presión osmótica, por ejemplo, la mezcla 4:1 al 50% de sólidos generó una presión osmótica igual a la mezcla 2.8:2.2 al 40% (p/p), sin embargo, a la misma presión osmótica se puede obtener

diferente transferencia de masa, lo cual es influenciado por la viscosidad (El-Aouar y col. 2006) y posiblemente por la formación de una membrana alrededor de la muestra que obstaculiza la transferencia de masa. Estos resultados indican que el medio osmótico de mayor concentración resultará en mayores beneficios en términos de transferencia de masa, por lo que en este trabajo se seleccionó la concentración de 50% de sólidos como la más adecuada para osmodeshidratar las placas de manzana.

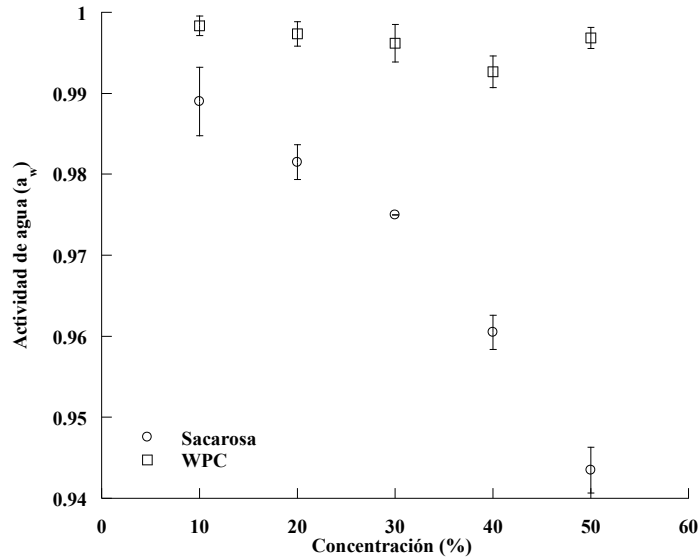


Fig. 1. Efecto de la concentración en soluciones de WPC y sacarosa sobre la actividad de agua ( $a_w$ ).

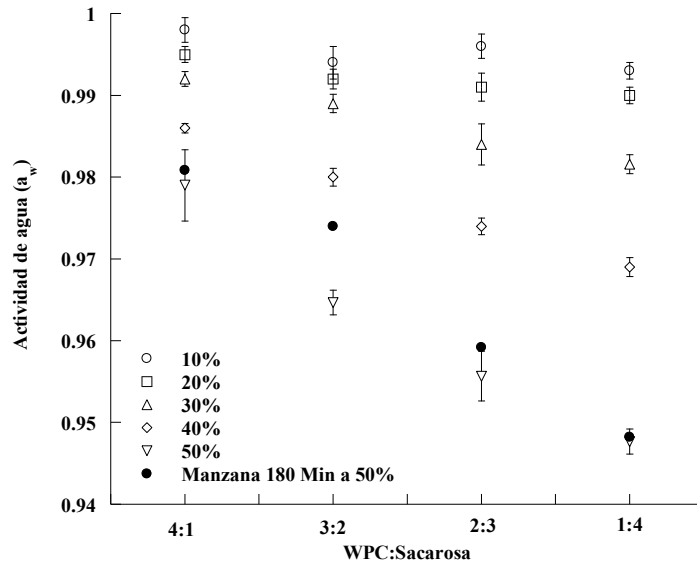


Fig. 2. Efecto de la concentración en soluciones de las mezclas  $X_{wpc}:X_s$  (concentrado de proteína de suero de leche-sacarosa) sobre la actividad de agua ( $a_w$ ). El símbolo obscuro indica la  $a_w$  de la placa de manzana después de 180 min de tratamiento osmótico.

Tabla 1. Parámetros del modelo lineal para la presión osmótica en las mezclas concentrado de proteína de suero de leche:sacarosa a diferentes concentraciones.

Concentración de solutos (%)	Pendiente (m)	Intercepto (b)	R <sup>2</sup>
50	147,300	1.698 × 10 <sup>6</sup>	0.990
40	80,313	1.164 × 10 <sup>6</sup>	0.999
30	58,902	5.890 × 10 <sup>5</sup>	0.991
20	22,203	5.513 × 10 <sup>5</sup>	0.956
10	17,983	2.064 × 10 <sup>5</sup>	0.757

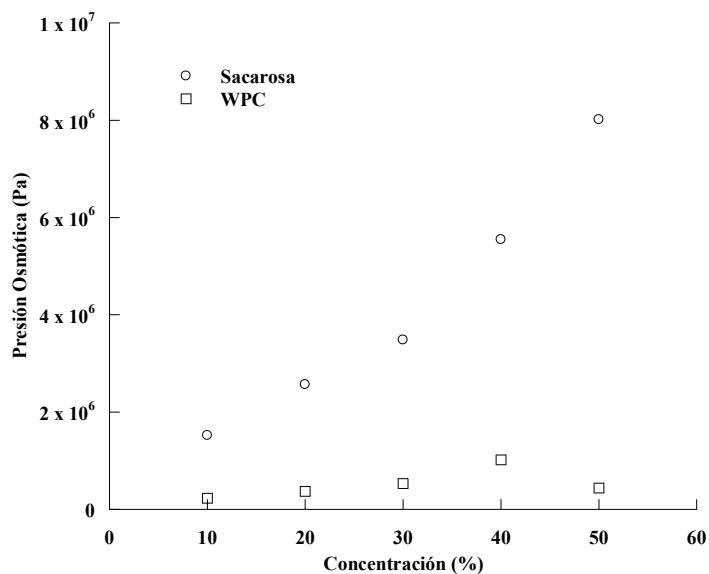


Fig. 3. Relación entre la concentración y presión osmótica de las soluciones de proteína, sacarosa.

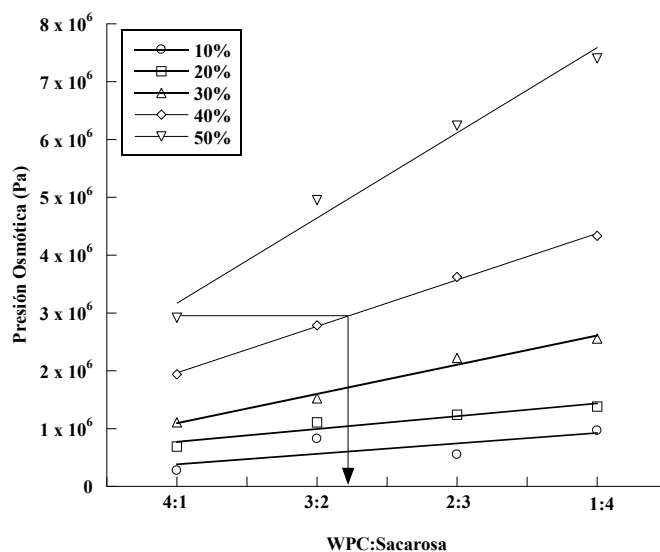


Fig. 4. Relación entre la composición de las mezclas WPC:sacarosa y la presión osmótica de las soluciones. Las líneas representan el ajuste de ecuaciones lineales.

### 3.2 Transferencia de masa en las placas de manzana

En la Fig. 5 se presenta la transferencia de masa de las sacarosa y de las mezclas de WPC:sacarosa a diferentes proporciones. Se puede apreciar que hubo un fuerte incremento de *ML*, *WL* y *SG* en los primeros 90 minutos del proceso, y posteriormente se aproximaba a un pseudoequilibrio. El efecto anterior se puede deber a la formación de una capa superficial de sólidos y a cambios estructurales en el tejido celular que influyen en la resistencia a la transferencia de masa (Lenart y Flink, 1984; Azuara y col., 2002; Ganjloo y col., 2011). La relación 4:1 no aparece en virtud de que hubo un incremento de masa (*ML*) durante el proceso de osmodeshidratación, debido a la cantidad de WPC (40% p/p) y posiblemente al alto

peso molecular de las proteínas que obstaculizó la salida de agua de la fruta a la solución. Sin embargo, hubo una ganancia de sólidos (datos no mostrados), probablemente debido a la entrada de sacarosa de menor peso molecular y a la acumulación de la proteína alrededor de la placa de manzana. Lo encontrado en este estudio fue similar a lo reportado en un trabajo anterior, en donde se utilizaron placas de manzana inmersas en solución de WPC al 30% (p/p) (Flores-Andrade y col., 2012); estas tendencias también fueron reportadas por Mújica-Paz y col. (2003), en la osmodeshidratación de rebanadas rectangulares de manzana en soluciones de sacarosa, en concentraciones de 40 a 50 °Brix a 40°C, en las que se observó un aumento de masa del 2%, atribuyéndolo a la alta porosidad efectiva de la manzana ( $\varepsilon_e = 0.33$ ).

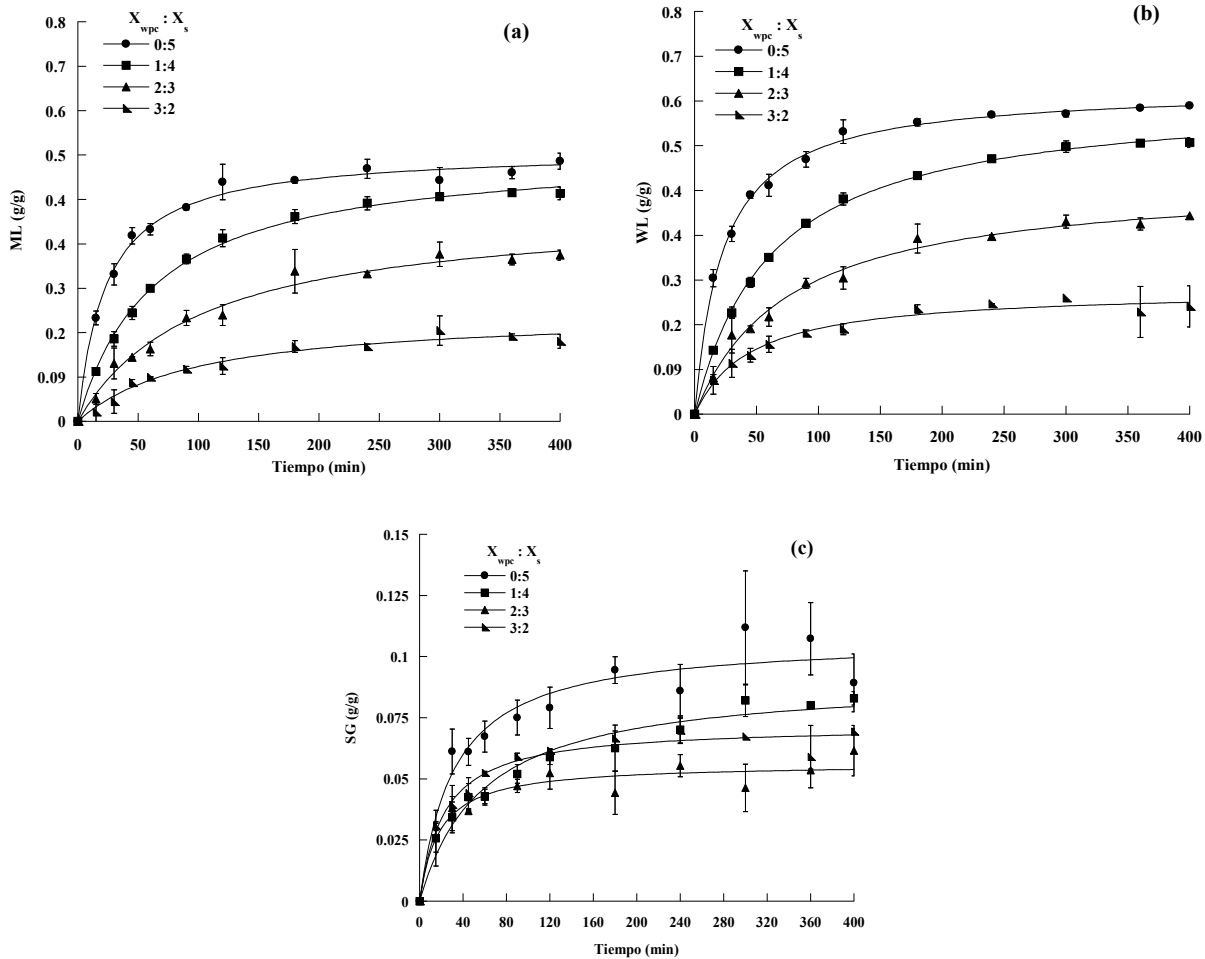


Fig. 5. Cinéticas de pérdida de masa *ML* (a), pérdida de agua *WL* (b) y ganancia de sólidos *SG* (c) de placas de manzana durante su tratamiento osmótico en mezclas  $X_{wpc}:X_s$  (WPC-sacarosa) al 50% de sólidos (p/p) a 40°C.

Tabla 2. Parámetros del modelo cinético para pérdida de masa (*ML*), pérdida de agua (*WL*) y ganancia de sólidos (*SG*) durante la deshidratación osmótica de placas de manzana.

Mezcla $X_{wpc}:X_s$	<i>ML</i>				<i>WL</i>			<i>SG</i>	
	$S_0$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$ML_\infty$	$R^2$	$S_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$WL_\infty$	$R^2$	$S_2$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$SG_\infty$	$R^2$
0:5	0.045	0.537	0.992	0.044	0.646	0.995	0.036	0.104	0.887
1:4	0.016	0.537	0.994	0.016	0.628	0.998	0.015	0.094	0.951
2:3	0.009	0.430	0.941	0.013	0.468	0.982	0.040	0.057	0.875
3:2	0.012	0.203	0.911	0.013	0.289	0.981	0.045	0.072	0.986

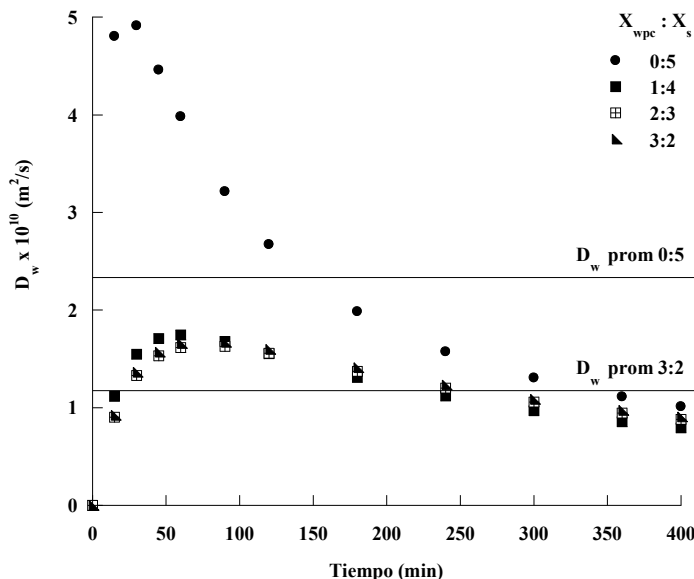


Fig. 6. Efecto de los componentes de la mezcla  $X_{wpc}:X_s$  (WPC:sacarosa) a 50% de sólidos (p/p) sobre los coeficientes aparentes de difusión del agua ( $D_w$ ) durante el proceso de osmodeshidratación.

La Tabla 2 muestra los parámetros cinéticos en donde se puede notar que las cantidades de  $X_{wpc}$  y  $X_s$  afectaron las cinéticas de osmodeshidratación en las placas de manzana como se observa en la Fig. 5. El incremento de WPC influye negativamente en la transferencia de masa, disminuyendo las constantes cinéticas de 0.045 a 0.012 y 0.044 a 0.013 para *ML* y *WL*, respectivamente, esto debido a que decrece la fuerza impulsora del proceso osmótico (Fig. 3). El incremento de la viscosidad de las mezclas WPC:sacarosa afectan en la transferencia de masa durante el tratamiento osmótico, de acuerdo con lo que también fue reportado por El-Aouar y col. (2006) y Khoyi y Hesari, (2007), para soluciones concentradas de sacarosa y jarabe de maíz, las cuales ocasionaron reducción en la velocidad de *WL* y/o bajas difusividades de agua.

Las cinéticas de *SG* en las placas de manzana también fueron modificadas por las concentraciones de WPC y sacarosa. Un alto contenido de sacarosa favorece la ganancia de sólidos debido a su bajo peso molecular, como se aprecia para las relaciones  $X_{wpc}:X_s$  0:5, 1:4 y 2:3 con

*SG* $_\infty$  de 0.104, 0.094 y 0.057, respectivamente. Saurel y col. (1994) y Azuara y col. (2002), utilizando alta concentración de solutos de bajo peso molecular mostraron mayor transferencia de masa en manzanas, efecto de la plasmólisis celular; contrario a lo que sucede con solutos de alto peso molecular en la que no se presenta plasmólisis y la ganancia de sólidos es más baja. Cuando se incrementó el contenido de WPC en las mezclas 2:3 a 3:2 aumentó la ganancia de sólidos *SG* $_\infty$  de 0.057 a 0.072 g/g como se observa en la Tabla 2, lo cual posiblemente se debió a la acumulación de la proteína en la superficie de las placas de manzana (Camirand y col., 1992; Marceliano, 2009; García y col., 2009) y al tamaño molecular de la proteína que obstaculizó su penetración dentro del tejido celular. en este sentido, la disminución de la salida de agua a mayor contenido de WPC también sugiere que solutos de alto peso molecular forman una capa densa en la superficie de los discos de manzana, lo cual produce una resistencia a la transferencia de masa.

En la Fig. 6 se presentan los cambios durante el proceso de osmodeshidratación de los coeficientes de difusión de agua ( $D_w$ ). Se aprecia que a menor concentración de sacarosa y al incrementar el contenido de WPC los  $D_w$  promedio disminuyen de 2.32 a  $1.16 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s; estos valores fueron similares a los reportados previamente para manzana, pepino y albaricoque osmodeshidratados con sacarosa y maltodextrina, en el rango de 0.4 a  $6.8 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, (Lazaridez y col., 1997; Azuara y Beristain, 2002; Jalae y col., 2011). Los valores de  $D_w$  obtenidos, confirman que la presencia del concentrado de proteína de suero de leche en la solución osmótica genera una resistencia a la pérdida de agua; sin embargo, se ha reportado que solutos de alto peso molecular como la maltodextrina en combinación con sacarosa usada para osmodeshidratar rebanadas de manzana mejoraron la transferencia de agua (Azuara y Beristain, 2002). Estas diferencias pueden ser atribuidas al efecto de las energías de interacción de los solutos de alto peso molecular con las moléculas de agua. Existen trabajos en donde se reportan bajos coeficientes de difusión de agua en rebanadas de piña a mayor concentración en la solución osmótica, lo que fue atribuido al asentamiento de solutos en concentraciones superiores a 60°Brix (Beristain y col., 1990).

## Conclusiones

Las mezclas de WPC y sacarosa tienen un efecto sinérgico en la transferencia de masa ya que incrementan la presión osmótica, en comparación con las soluciones individuales de sacarosa o WPC. La presión osmótica aumentó cuando en la mezcla se tuvo mayor cantidad de sacarosa ocasionando mayor pérdida de masa y de agua, que se observó en los coeficientes de difusión aparente promedio para agua, elevándose de 1.16 a  $2.32 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. A altas concentraciones de WPC se ocasiona un efecto de bloqueo causado por la membrana que se forma alrededor de las muestras de manzana, lo que origina una ganancia de sólidos con  $SG_\infty$  de 0.057 a 0.072 g/g. Al cortar la fruta se exponen poros y espacios intercelulares que propician la ganancia de proteína en el tejido de la manzana; no obstante, la impermeabilidad de los materiales poliméricos al interior de las células crean una barrera que limita el paso de solutos de menor tamaño, como es el caso de la sacarosa.

La transferencia de masa entre el producto y la solución se incrementó en las mezclas de sacarosa y WPC, el uso de soluciones con WPC como único componente no es recomendable debido a que su presión osmótica es muy baja. Los resultados obtenidos en este trabajo, proporcionan una forma diferente de procesar productos alimenticios en donde se mejora su funcionalidad.

## Agradecimientos

Se agradece al Programa de Mejoramiento del Profesorado a través del proyecto PROMEP/103.5/11/5481, y al programa

de mejoramiento CONACyT, por el apoyo brindado a través del proyecto 24203.

## Nomenclatura

$a_w$	actividad de agua
$C_0$	humedad inicial en base húmeda, g/g
$C_t$	humedad en base húmeda al tiempo t, g/g
$D_s$	coeficiente de difusión del soluto, m <sup>2</sup> /s
$D_w$	coeficiente de difusión del agua, m <sup>2</sup> /s
$l$	mitad del grosor de la placa, m
$ML$	pérdida de masa, g/g
$ML_\infty$	pérdida de masa cuando el sistema alcanza el equilibrio, g/g
$M_0$	masa inicial, masa de la placa antes de la deshidratación osmótica, g
$M_t$	masa al tiempo t, masa de la placa después de la deshidratación osmótica, g
$R$	constante universal de los gases ideales, 8.3144 Pa m <sup>3</sup> /Kmol
$S_0$	constante cinética relacionada con la pérdida de masa, 1/min
$S_1$	constante cinética relacionada con la pérdida de agua, 1/min
$S_2$	constante cinética relacionada con la ganancia de sólidos, 1/min
$SG$	ganancia de sólidos, g/g
$SG_\infty$	ganancia de sólidos cuando el sistema alcanzan el equilibrio, g/g
$T$	temperatura, K
$t$	tiempo de inmersión, min
$V$	volumen molar del agua pura, m <sup>3</sup> /mol
$WL$	pérdida de agua, g/g
$WL_\infty$	pérdida de agua cuando el sistema alcanza el equilibrio, g/g
$WL_\infty^{mod}$	pérdida de agua en el equilibrio estimado con el modelo, g/g
$WL_\infty^{exp}$	pérdida de agua en el equilibrio obtenido experimentalmente, g/g
$X_s$	cantidad de sacarosa en la mezcla, %
$X_{wpc}$	cantidad de proteína en la mezcla, %

### Símbolos griegos

$\varphi$	presión osmótica, Pa
$\pi$	constante

## Referencias

- Archibald, A. (2002). *La proteína concentrada del suero de leche una super estrella en la nutrición*. U. S. Dairy Export Council. United States of America.
- Azuara, E., Beristain, C. I. y Gutiérrez, G. F. (2002). Osmotic dehydration of apples by immersion in concentrated sucrose/maltodextrin solutions. *Journal of Food Processing Preservation* 26, 295-306.



- Azuara, E., Cortes, R., Garcia, H. S. y Beristain, C. I. (1992). Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology* 27, 409-418.
- Bekele, Y. y Ramaswamy, H. (2010). Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings. *EJAST*, 1, 1-15.
- Bellary, A. N., Sowbhagya, H. B., y Rastogi N. K. (2011). Osmotic dehydration assisted impregnation of curcuminoids in coconut slice. *Journal of Food Engineering* 105, 453-459.
- Beristain, C. I., Azuara, E., Cortés, R. y García, H. S. (1990). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *International Journal of Food Science and Technology* 25, 576-582.
- Camirand, W., Krochta, J. M., Pavlath, A. E., Wong, D. y Cole, M. E. (1992). Properties of some edible carbohydrate polymer coatings for potential use in osmotic dehydration. *Carbohydrate Polymers* 17, 39-49.
- Dangaran, K., Tomasula, P. M. y Qi P. (2009). Structure and function of protein-based edible films and coatings. En: *Edible Films and Coatings for Food Applications*, (M. E. Embuscado y K. C. Huber, eds.), Pp. 25-56. Springer, New York.
- De Wit, J. N. (1998). Nutritional and functional characteristics of whey proteins in food products. *Journal of Dairy Science* 81, 597-608.
- Dermesonlouoglou, E. K., Pourgouri, S. y Taoukis, P. S. (2008). Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 9, 542-549.
- El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L. y XidiehMurr, F. E. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering* 75, 267-274.
- Flores-Andrade, E., Tapia-Santiago, M., Rangel-Sánchez, K. E., Ortiz-Sánchez, C. A., González-Arno, M. T. y Beristain, C. I. (2012). Evaluación cinética de la impregnación de sólidos en placas de manzana utilizando una solución de proteína de suero de leche. En: *Proceedings of the XXXIII National Meeting and II International Congress AMIDIQ*, San Jose del Cabo, BCS, México.
- Ganjloo, A., Rahman, R. A., Bakar, J., Osman, A. y Bimacr, M. (2011). Kinetics modeling of mass transfer using Peleg's equation during osmotic dehydration of seedless guava (*Psidium guajava* L.): effect of process parameters. *Food and Bioprocess Technology* 5, 2151-2159.
- García, M. A., Pinotti, A., Martino, M. N. y Zaritzky, N. E. (2009). Characterization of Starch and Composite Edible Films and Coatings. En: *Edible Films and Coatings for Food Applications*, (M. E. Embuscado y K. C. Huber, eds.), Pp. 169-210. Springer, New York.
- Ispir, A. y Toğrul, I. T. (2009). Osmotic dehydration of apricot: kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering Research and Design* 87, 166-180.
- Jalaei, F., Fazeli, A., Fatemian, H., y Tavakolipour, H. (2011). Mass transfer coefficient and characteristics of coated apples in osmotic dehydrating. *Journal of Food Engineering* 78, 1355-1360.
- Khoyi, M. R. y Hesari, J. (2007). Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *Journal of Food Engineering* 78, 1355-1360.
- Lazarides, H. N., Gekas, V. y Mavroudis, N. (1997). Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing. *Journal of Food Engineering* 31, 315-324.
- Lazarides, H.N., Katsanidis, E. y Nickolaidis, A. (1997). Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering* 25, 151-166.
- Lenart, A. y Flink, J. M. (1984). Osmotic dehydration of potato. II. Spatial distribution of the osmotic agent. *Journal of Food Technology* 19, 65-89.
- Lewicki, P. P. y Lenart, A. (1995). Osmotic dehydration of fruits and vegetables. En: *Handbook of Industrial Drying* (A.S. Mujumdar, ed.), Pp. 691-713. Marcel Dekker, New York. 399-405.
- Lewicki, P. P. (2009). Data and Models of Water Activity I: Solutions and Liquid Foods. En: *Food Properties Handbook*, (M.S. Rahman ed.), Pp. 33-67. Taylor & Francis Group, Nueva York.
- Marceliano, B. N. (2009). Structure and function of polysaccharide gum-based edible films and coatings. En: *Edible Films and Coatings for Food Applications*, (M. E. Embuscado y K. C. Huber, eds.), Pp. 169-210. Springer, New York.
- Matusek, A., Czukor, B. y Merész, P. (2008). Comparison of sucrose and fructo-oligosaccharides as osmotic agents in apple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 9, 365-373.
- Mavroudis, N. E., Gidley, M. J. y Sjöholm, I. (2012). Osmotic processing: effects of osmotic medium composition on the kinetics and texture of apple tissue. *Food Research International* 48, 839-847.
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E. y Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering* 57, 305-314.

- Phisut, N. (2012). Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *International Food Research Journal* 19, 7-18.
- Qi, H., Le Maguer, M. y Sharma, S.K. (1998). Design and selection of processing conditions of a pilot scale contactor for continuous osmotic dehydration of carrots. *Journal of Food Processing and Engineering* 21, 75-88.
- Rahman, M. S. (1995). *Food Properties Handbook*. 2da ed. Editorial CRC Press, New York, USA.
- Saurel, R., Raoult-Wack, A. L., Ríos, G. y Guilbert S. (1994). Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue. *International Journal of Food Science Technology* 29, 531-542.
- Silva, K. S., Fernandes, M. A. y Mauro, M.A. (2013). Osmotic dehydration of pineapple with impregnation of sucrose, calcium, and ascorbic acid. *Food Bioprocess Technology*, DOI 10.1007/s11947-013-1049-0.
- Singh, B., Panesar, P. S., Nandas, V. y Kennedy J. F. (2010). Optimisation of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. *Food Chemistry* 123, 590-600.
- Yadav, A. K. y Singh, S. V. (2012). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science Technology*, DOI 10.1007/s13197-012-0659-2.