

## DINÁMICA DE LA TRANSFERENCIA DE MASA EN LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA CON PULSO DE VACÍO DE LÁMINAS DE SARDINA

### MASS TRANSFERENCE DYNAMICS IN PULSED VACUUM OSMOTIC DEHYDRATION OF SARDINE SHEETS

OTONIEL CORZO<sup>1</sup>, NELSON BRACHO<sup>2</sup>, JAIME RODRÍGUEZ<sup>1</sup> Y MARESVI GONZÁLEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Tecnología de Alimentos, <sup>2</sup> Departamento de Estadística. Núcleo de Nueva Esparta. Universidad de Oriente. Venezuela. E-mail: otocorzo@cantv.net.

#### RESUMEN

Se evaluó la validez del modelo de Azuara *et al.* (1992) en el caso de la deshidratación osmótica con pulso de vacío de láminas de sardina, en salmueras a diferentes concentraciones (21, 24 y 27 %NaCl) y temperaturas (30, 32, 34, 36 y 38°C). Los altos coeficientes de determinación ( $R^2 > 0.92$ ) indicaron la aceptabilidad del modelo para estudiar la dinámica de la transferencia de masa. Se determinaron las constantes de velocidad para la pérdida de agua y ganancia de sal. A una temperatura constante, las constantes de velocidad aumentaron ( $p < 0.05$ ) con el incremento en la concentración de la salmuera. A una concentración de la salmuera constante, la constante de velocidad de la pérdida de agua no depende de la temperatura ( $p > 0.05$ ), pero la constante de velocidad para la ganancia de sal aumenta al incrementarse la temperatura ( $p < 0.05$ ). Aplicando regresión lineal múltiple se ajustaron las constantes de velocidad como una función de la concentración y temperatura de la salmuera. Los modelos ajustados explicaron el 97,52 % de la variabilidad en la constante de velocidad para la pérdida de agua y el 97,77% para la de ganancia de sal.

PALABRAS CLAVE: transferencia de masa, deshidratación osmótica, sardina, modelo de Azuara.

#### ABSTRACT

The Azuara *et al.* (1992) model was tested for validity in the case of pulsed vacuum osmotic dehydration of sardine sheets kept at different conditions of brine concentrations (21, 24, and 27% NaCl) and temperatures (30, 32, 34, 36, and 38° C). High determination coefficients ( $R^2 > 0.92$ ) underscored the acceptability of the model for the study of mass transfer dynamics. The rate constants for water loss and salt gain were determined. At constant temperature the rate constants for both water loss and salt gain increased ( $p < 0.05$ ) with the increase in brine concentration. At constant brine concentration an increase in temperature did not reflect on the rate constant of water loss ( $p > 0.05$ ), but the salt gain rate constant increased when the temperature rose. Multiple linear regression fit the rate constants as functions of brine concentration and temperature. The models thus fit accounted for a rate constant variability of 97.52% in water loss and 97.77% in salt gain.

KEY WORDS: mass transference, osmotic dehydration, sardine, Azuara model.

#### INTRODUCCIÓN

Existen procesamientos que involucran la interacción entre el agua que contiene el alimento y la presente en el medio circundante a la temperatura ambiente, tales como el secado, la deshidratación osmótica, almacenamiento y empacado. La deshidratación osmótica generalmente se usa como un tratamiento previo de los alimentos que se someterán a otros procesos tales como la congelación (Ponting, 1973), liofilización (Hawkes y Flink, 1978), secado al vacío (Dixon y Jen, 1977), y secado (Nanjundaswamy *et al.*, 1978). La deshidratación osmótica es un proceso viable para la eliminación parcial de agua en el cual el material celular se sumerge en una solución concentrada de un soluto soluble; una fuerza impulsora para la remoción de agua se establece debido a la diferencia en la presión

osmótica entre el alimento y la solución circundante. La estructura celular compleja del alimento actúa como una membrana semipermeable, pero dado que la membrana responsable del transporte osmótico no es absolutamente selectiva, otros solutos presentes en las células también pueden lixivarse en la solución osmótica y el soluto de la solución puede absorberse en el producto (Dixon y Jen, 1977; Lericci *et al.*, 1985; Giangiacomo *et al.*, 1987). Durante el proceso, el soluto de la solución osmótica, el contenido de agua, y el peso, cambian y habrá finalmente un estado de equilibrio. Los cambios de masa durante la deshidratación osmótica se han estudiado en patata (Biswal y Bozorgmehr, 1991; Lenart y Flink, 1994), manzana (Mosálve-González *et al.*, 1993; Panagiotou *et al.*, 1998), plátano y fruta del kiwi (Panagiotou *et al.*, 1998), melón (Marulanda, 1998; Corzo y Gómez, 2003), tilapia (Medina-

Vivanco *et al.*, 1998) y láminas de sardina (Ortiz, 2002) pero no se han determinado las condiciones de equilibrio. Azuara *et al.* (1992) propusieron un modelo para evitar las limitaciones del modelo de difusión de Fick en casos prácticos, el cual se ha considerado aceptable para predecir la dinámica de la transferencia de masa en la deshidratación osmótica en alimentos de origen vegetal (Raoult-Wack, 1994), pero no hay información disponible sobre la dinámica de la transferencia de agua y soluto en la deshidratación osmótica del pescado. El objetivo de esta investigación fue validar el modelo de Azuara *et al.* (1992) para estudiar la dinámica de la transferencia de masa en la deshidratación osmótica con pulso de vacío en láminas de sardina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Preparación de la Muestra

Se utilizó sardina (*Sardinella aurita*) adquirida directamente a los pescadores de la zona de Los Cocos de la Isla de Margarita, para así disponer del producto fresco y proveniente de la misma zona de captura. Las sardinillas de 15-20 cm de largo y un peso de 30-35 g, se filetearon manualmente con cuchillos de acero limpios, y luego los filetes se cortaron en láminas en el músculo más cercano a la cabeza, obteniéndose así 2 láminas por cada filete. Las dimensiones de cada lámina fueron medidas con un micrómetro, teniendo un promedio de  $20,1 \pm 0,5$  mm de largo,  $15,0 \pm 0,6$  mm de ancho y  $6,4 \pm 0,9$  mm de espesor. Al azar se seleccionaron láminas para formar siete grupos de cuatro láminas cada uno y se determinó el peso inicial de cada una. Cada grupo experimental se colocó en una celda de cuatro compartimientos con el objeto de evitar la interferencia entre las láminas.

### Deshidratación Osmótica

Para realizar la deshidratación osmótica se utilizaron soluciones preparadas con sal común que luego se colocaron en desecadores sumergidos en baños termoregulados. La solución preparada estaba en proporción de 20:1 con respecto a la masa de sardina para evitar dilución por efecto del agua removida de la sardina durante la deshidratación. Los siete grupos se introdujeron simultáneamente en una solución salina de concentración y temperaturas dadas, se aplicó un vacío de 700 mbar durante 10 min, se rompió el vacío y se continuó a presión atmosférica la deshidratación osmótica, posteriormente se extrajo un grupo cada 20 min durante la primera hora, cada 30 min durante la segunda hora y cada 60 min durante las dos horas restantes. Las láminas deshidratadas de cada grupo fueron escurridas durante 5 min, secadas superficialmente con papel absorbente y luego pesadas individualmente. A cada lámina se le determinó su

contenido de agua y sal. Todos los resultados corresponden al promedio de cuatro réplicas.

La temperatura, concentración de la salmuera y el tiempo de deshidratación fueron 30, 32, 34, 36 y 38 °C, 21, 24, y 27% NaCl, y 20, 40, 60, 90, 120, 180 y 240 min, respectivamente.

La solución osmótica se preparó mezclando la sal de calidad comercial con la cantidad apropiada de agua destilada. La proporción de salmuera a peso de las láminas siempre fue superior que 20:1 para evitar dilución significativa del medio osmótico por la extracción de agua de la muestra, lo cual llevaría a la reducción local de la fuerza osmótica durante el proceso. La concentración de la salmuera se controló a lo largo de cada experimento. La salmuera fue agitada continuamente con un agitador magnético para mantener una temperatura uniforme a lo largo del experimento, reforzando así las condiciones de equilibrio. Las temperaturas también se controlaron utilizando un termómetro digital con precisión de  $\pm 0,1$  °C.

La concentración de la salmuera (% NaCl) inicial y durante cada tratamiento fue determinada por el método de Mohr (AOAC, 1990). La humedad de las láminas de sardina frescas y deshidratadas se determinó colocándolas en una estufa a vacío (0,1 mm Hg) y 60 °C hasta lograr un peso constante (AOAC, 1990). La pérdida de agua ( $w$ ) y la ganancia de sal ( $s$ ) fueron calculadas según las siguientes ecuaciones:

$$w = \frac{(m_t \cdot x_w) - (m_0 \cdot x_{w0})}{m_0} \quad (1)$$

$$s = \frac{(m_t \cdot x_{ss}) - (m_0 \cdot x_{ss0})}{m_0} \quad (2)$$

Donde  $m_t$  y  $m_0$  es el peso final (al tiempo  $t$ ) e inicial, respectivamente,  $x_w$  y  $x_{w0}$  es la fracción en peso de agua final (al tiempo  $t$ ) e inicial, respectivamente, y  $x_{ss}$  y  $x_{ss0}$  es la fracción en peso de sal final (al tiempo  $t$ ) e inicial, respectivamente en la muestra.

### Dinámica de la Transferencia de Masa

Los modelos teóricos de la cinética de la pérdida de agua y de ganancia de soluto están basados en la ley de difusión de Fick en un estado inestable. Las limitaciones de estos modelos en el caso de propósitos prácticos son: 1) supone que el alimento es un cuerpo semi infinito, 2) supone que el medio osmótico no cambia de concentración, 3) las soluciones analíticas sólo están

disponibles para las láminas, cilindros y cubos, y se necesitan técnicas numéricas para los materiales irregulares, 4) el punto de equilibrio se tiene que determinar experimentalmente, 5) supone la existencia de un sólo mecanismo de difusión para la remoción de agua, 6) no hay ningún efecto de la ganancia de sólido o de lixiviación, excepto del soluto, en la pérdida de agua, 7) el encogimiento del material debido a la pérdida de agua es despreciable, y 8) la resistencia externa a la transferencia de masa es despreciable.

Azuara *et al.* (1992) propusieron un modelo para evitar las limitaciones del modelo de difusión de Fick en casos prácticos y se ha encontrado adecuado para predecir la dinámica de la transferencia de masa en la deshidratación osmótica (Raoult-Wack, 1994). De acuerdo a un balance de masa para el agua:

$$w = w_e - w_m \quad (3)$$

Donde  $w$  es la pérdida de agua a un tiempo  $t$ ,  $w_e$  es la pérdida de agua en el equilibrio y  $w_m$  es el máximo de agua que puede difundirse pero que permanece en el alimento al tiempo  $t$ . Dado que a una concentración y temperatura constantes de la solución osmótica, la pérdida de agua sólo depende del tiempo, entonces hay una relación entre  $w$  y  $t$ :

$$w_m = \frac{w}{K} = \frac{w}{k_w t} \quad (4)$$

La relación entre  $K$ ,  $k_w$  y  $t$  se supone lineal considerado una cinética de orden cero. De las ecuaciones 3 y 4 se tiene:

$$\frac{t}{w} = \frac{1}{k_w w_e} + \frac{t}{w_e} \quad (5)$$

Los valores de pérdida de agua de equilibrio ( $w_e$ ) y de la constante de velocidad para el agua ( $k_w$ ) del modelo se pueden determinar de la pendiente y el intercepto de la línea recta correspondiente a la ecuación 5.

Similarmente, para la ganancia del soluto ( $s$ ) se puede escribir:

$$\frac{t}{s} = \frac{1}{k_s s_e} + \frac{t}{s_e} \quad (6)$$

Donde  $s_e$  es la ganancia de soluto de equilibrio y  $k_s$  la constante de velocidad para el soluto del modelo.

### Análisis Estadístico

Para la evaluación estadística de los resultados se usó un diseño factorial completo  $5 \times 3 \times 7$  (cinco temperaturas, tres concentraciones y siete tiempos). Se aplicó un análisis de varianza a los datos de pérdida de agua y ganancia de sal, para determinar los efectos de la concentración, temperatura y tiempo. La regresión lineal simple se utilizó para ajustar los datos de pérdida de agua y ganancia de sal al modelo de Azuara *et al.* (1992). La regresión lineal múltiple se usó para ajustar un modelo de predicción de las constantes de velocidad como una función de la concentración de la salmuera y la temperatura. Para todos los análisis estadísticos se utilizó el paquete estadístico Statgraphics 5.0 plus (Statistical Graphics Corp., Rockville, Md., U.S.A.).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza mostró que hay diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la pérdida de agua y la ganancia de sal causadas por la concentración y temperatura de la salmuera, tiempo de la deshidratación, y las interacciones de estos factores. La comparación múltiple de medias, según la prueba de LSD, mostró que la pérdida de agua y la ganancia de sal aumentaban al incrementarse la concentración, la temperatura y el tiempo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la deshidratación osmótica de hortalizas y frutas (Azuara *et al.*, 1992; Torreggiani, 1993; Raoult-Wack, 1994).

La regresión lineal fue usada para ajustar la pérdida de agua y ganancia de sal al modelo de Azuara *et al.* (1992). El modelo explicó entre el 88,76 y el 99,27% de la variabilidad en la pérdida de agua y entre el 93,03 y el 99,86% de la variabilidad en la ganancia de sal con un 99% de nivel de confianza (Tabla 1). Los altos valores del coeficiente de determinación ( $R^2 > 0,92$ ) indican la aceptabilidad del modelo para los estudios de la dinámica de transferencia de masa en la deshidratación osmótica de láminas de sardina, en las condiciones estudiadas. Azuara *et al.* (1992) observó un error máximo de 3,2% para predecir la pérdida de agua de equilibrio o ganancia de soluto en diferentes alimentos. Parjoko *et al.* (1996) encontraron aceptable el modelo de Azuara *et al.* (1992) para el transporte de masa en cuñas de piña.

Las constantes de velocidad para el agua y la sal se presentan en la Tabla 1. Los valores de la constante de velocidad de la ganancia de sal son mayores que los de la pérdida de agua, lo cual indica que el proceso de deshidratación osmótica se podría considerar también como un proceso de salado. El análisis de varianza mostró que  $k_w$  varía sólo con la concentración ( $p < 0,05$ ) (Tabla 2). La prueba de comparación múltiple de medias indicó que

$k_w$  aumentaba a medida que se incrementaba la concentración de la salmuera de 21 a 27 % NaCl. (Tabla 3). Esto es debido al aumento de la fuerza impulsora para la difusión del agua y de la sal. Una fuerza impulsora para la remoción de agua y ganancia de sal se establece debido a la diferencia en la presión osmótica entre el alimento y su solución circundante. El análisis de varianza mostró que  $k_s$  varía tanto con la concentración ( $p < 0,05$ ) como con la

temperatura ( $p < 0,05$ ) (Tabla 2). La prueba de comparación múltiple de medias indicó que  $k_s$  presenta un valor constante para las temperaturas de 34 a 36 °C pero aumenta al incrementarse la temperatura de 36 a 38 °C (Tabla 3), igualmente mostró que aumenta al incrementarse la concentración. Esto se puede atribuir a que la viscosidad de la salmuera disminuye a temperaturas altas facilitando así la transferencia de masa externa.

Tabla 1. Constantes de velocidad para la pérdida de agua y ganancia de sal

Concentración (%NaCl)	Temperatura (°C)	Pérdida de agua (g/g)		Ganancia de sal (g/g)	
		$k_w$	R <sup>2</sup>	$k_s$	R <sup>2</sup>
21	30	0,02175	0,8876	0,04316	0,9945
21	32	0,02172	0,9640	0,04873	0,9718
21	34	0,00224	0,9894	0,04799	0,9524
21	36	0,00223	0,9804	0,05040	0,9825
21	38	0,00220	0,9673	0,06287	0,9303
24	30	0,02615	0,9550	0,07415	0,9940
24	32	0,02559	0,9590	0,07184	0,9981
24	34	0,02723	0,9843	0,07813	0,9925
24	36	0,02623	0,9509	0,08180	0,9804
24	38	0,02626	0,9927	0,09844	0,9737
27	30	0,03240	0,9063	0,12432	0,9891
27	32	0,03144	0,9742	0,12816	0,9986
27	34	0,03170	0,9926	0,13364	0,9982
27	36	0,03225	0,9913	0,14189	0,9971
27	38	0,03410	0,9603	0,14193	0,9892

Tabla 2. Análisis de varianza para las constantes de velocidad

Fuente	g.l	$k_w$		$k_s$	
		Suma de Cuadrados	Valor p	Suma de Cuadrados	Valor p
Concentración	2	0,0002708	0,0000	0,0178003	0,0000
Temperatura	4	0,0000023	0,3672	0,0007938	0,0013
Residual	8	0,0000038		0,0001187	

Valor p < 0,05 indica efecto significativo a  $\alpha = 0,05$

Tabla 3. Comparación múltiple de medias de las constantes de velocidad

Factor	$k_w$	$k_s$	Factor	$k_w$	$k_s$
Concentración			Temperatura		
21	0,022 <sup>a</sup>	0,051 <sup>a</sup>	30		0,081 <sup>a</sup>
24	0,027 <sup>b</sup>	0,081 <sup>b</sup>	32		0,083 <sup>b</sup>
27	0,032 <sup>c</sup>	0,134 <sup>c</sup>	34		0,087 <sup>cd</sup>
			36		0,091 <sup>d</sup>
			38		0,101 <sup>e</sup>

Letras diferentes indican medias estadísticamente diferentes

### Modelación de las constantes de velocidad

Los valores de las constantes de velocidad para el agua y la sal se ajustaron a modelos predictivos en función de la concentración de la salmuera (Y) y la temperatura (el T) según la ecuación de la ley de potencia ( Magee *et al.*, 1983; Rahman y Lamb, 1990; Parjoko *et al.*, 1996):

$$k_w = 2,08 \times 10^{-4} Y^{1,53} \quad (7)$$

$$k_s = 9,42 \times 10^{-9} Y^{3,89} T^{1,03} \quad (8)$$

Los modelos explicaron el 97,52% de la variabilidad de constante de velocidad para la pérdida de agua y el 97,77% de la variabilidad de la constante de velocidad para la ganancia de sal, a un 99% de nivel de confianza (Tabla 4). En las ecuaciones 7 y 8, la constante de potencia de la concentración para la constante de velocidad de la pérdida de agua es menor que el de la constante de velocidad de la ganancia de sal, y ambas son positivas. Esto indica que la influencia de la concentración es menor en la constante de velocidad de la pérdida de agua que en la de ganancia de sal y que las dos constantes aumentan a medida que se incrementa la concentración. También, la constante de potencia de la temperatura para la constante de la ganancia de sal es positiva. Esto indica que la constante aumenta al incrementarse la temperatura.

Tabla 4. Regresión lineal múltiple para las constantes de velocidad como una función de la temperatura y concentración de la salmuera.

Fuente de variación	$k_w$		$k_s$	
	Estimado	Valor p	Estimado	Valor p
Constante	$2,08 \times 10^{-4}$	<0,0001	$9,42 \times 10^{-9}$	<0,0001
T	-	-	1,03	<0,0001
Y	1,53	<0,0001	3,89	<0,0001
R <sup>2</sup>	0,9752	<0,0001	0,9777	<0,0001

Valor p < 0.0001 indica efecto significativo a  $\alpha = 0,0001$

### CONCLUSIONES

El modelo de Azuara *et al.* (1992) es aceptable para predecir la transferencia de masa en láminas de sardina durante la deshidratación osmótica con pulso de vacío, a las condiciones de concentración y temperatura de la salmuera estudiadas. Las constantes de velocidad para la pérdida de agua y la ganancia de sal fueron influenciadas por la concentración de la salmuera, y la de la ganancia de sal también fue influenciada por la temperatura. Las constantes de velocidad se relacionaron con la temperatura y la concentración de la salmuera por la ecuación de la ley de potencia.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis. 15<sup>th</sup> Edn. Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemists.
- AZUARA E., BERISTAIN C. J. & GARCIA H. S. 1992. Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *J Food Sci Technol.* 29: 239-242.
- BISWAL R. N. & BOZPRGMEHR, K. 1991. Equilibrium data for osmotic concentration of potato in NaCl-water solution. *J Food Proc Eng.* 14: 237-245.
- CORZO O. & GÓMEZ E. R. 2003. Optimization of osmotic dehydration of cantaloupe using desired function methodology. *J Food Eng.* 64(2): 213-219.
- DIXON G. M. & JEN J. J. 1977. Changes of sugar and acid in osmotic dried apple slices. *J Food Sci.* 42: 1126-1131
- GIANGIACOMO R., TORREGGIANI D. & ABBO E. 1987. Osmotic dehydration of fruit. Part I: sugar exchange between fruit and extracting syrup. *J Food Proc Preserv.* 11: 183-195
- HAWKES J. & FLINK J. M. 1978. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. *Intl J Food Sci Technol.* 2: 265-284
- LENART A. & FLINK J. M. 1984. Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of the osmotic process. *J Food Technol.* 19: 45-63
- LERICI C. R., PINNAVAIA G., ROSA M. D. & BARTOLUCCI L. 1985. Osmotic dehydration of fruits: influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. *J Food Sci.* 50: 1217-1226
- MAGEE T. R. A., HASABALLAH A. A. & MURPHY W. R. 1983. Internal mass transfer during osmotic dehydration of apple slices in sugar solution. *Irish J Food Sci Technol.* 7: 147-150
- MARULANDA R. 1998. Predicción de la cinética de secado osmótico del melón cortado en forma cilíndrica a diferentes temperaturas y concentraciones de la solución osmótica. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Boca del Río.
- MEDINA-VIVANEN, M., SOBRAL, P. J. A. & HUBINGER, M. D. 1998. Mass transfer during dewatering and salting of tilapia for different volume brine to fillets ratios. Proceedings of 11<sup>th</sup>. International Drying Symposium, Halkidiki, Greece, 19-22. August, (pp. 852-859).
- MOSALVE-GONZÁLEZ, A., BARBOSA-CÁNAVOS, G.V. & CAVALIERI, R.P. 1993. Mass transfer and textural changes during

- processing of apple by combined methods. *J. Food Sci.* 58: 1118-1124.
- NANJUNDASWAMY A. M., RADHAKRISHNAIAH S. G., BALACHANDRAN C., SAROJA S. & MURTHY KBS. 1978. Studies of development of new categories of dehydrated product from indigenous fruits. *Indian Food Pack.* 22: 91-93
- ORTIZ S. 2002. Modelación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de láminas de sardina aplicando un diseño experimental factorial 3<sup>3</sup>. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Boca del Río
- PANAGIOTOU, N. M., KARATHANOS, V. T. & MAROULIS, Z. B. 1998. Mass transfer in osmotic dehydration of some fruits. *Intl. J. Food Sci. Technol.* 3: 267-284.
- PARJOKO M., RAHMAN M. S., BUCKLE K. A. & PERERA C. 1996. Osmotic dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *Lebensm.-Wiss u-Technol.* 29: 452-459
- PONTING I. D. 1973. Osmotic dehydration of fruits-Recent modifications and applications. *Proc Biochem.* 8: 18-20
- RAHMAN M. S. & LAMB J. 1990. Osmotic dehydration of pineapple. *J Food Sci Technol.* 27: 150-152
- RAOULT-WACK A. L. 1994. Advances in osmotic dehydration. *Trends Food Sci Technol.* 5: 255-260
- TORREGGIANI D. 1993. Osmotic dehydration in fruits and vegetables processing. *Food Res Intl.* 26: 59-68