

## Estudio comparativo de los modelos de Peleg y Azuara et al. aplicados a la deshidratación osmótica de anco (*Cucurbita moschata*)

María F. Kvapil<sup>1</sup>, Lucrecia L. Chaillou<sup>1</sup>, Silvia del C. Rodríguez<sup>1</sup>, Ana G. Qüesta<sup>1</sup>, Rodolfo H. Mascheroni<sup>2</sup>

(1) Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICyTA), Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

(2) Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET - Universidad Nacional de La Plata  
florykvapil@hotmail.com

**RESUMEN:** El anco es una hortaliza con una considerable concentración de nutrientes tales como carotenoides, minerales, vitaminas, de contenido energético bajo y gran cantidad de fibra. La deshidratación osmótica puede utilizarse como un tratamiento previo a otros procesos de conservación o bien para obtenerlo como alimento mínimamente procesado. Para describir la cinética del proceso, los modelos empíricos de Peleg y de Azuara et al. se utilizan con frecuencia puesto que tienen la ventaja de permitir la predicción de la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en el equilibrio. El objetivo de este trabajo fue investigar la aplicabilidad de las ecuaciones de Peleg y de Azuara et al., al modelado de la transferencia de masa que se produce durante la deshidratación osmótica de cubos de anco, de 0,5; 1 y 1,5 cm sumergidos en solución concentrada de sacarosa de 55°Bx.

### 1 INTRODUCCIÓN

La conservación de alimentos para extender el período de su vida útil, con la garantía de inocuidad y de calidad, es una preocupación constante de la industria alimentaria. Como resultado, han surgido numerosas técnicas de procesamiento mínimo. Dentro de esas técnicas, la deshidratación osmótica (DO) se aplica para modificar la composición de un alimento por eliminación parcial de agua e impregnación de diversos compuestos, sin afectar notablemente su integridad (Palou, 1994; Sachetti et al, 2001). Se utiliza como pre-tratamiento de productos frutihortícolas que serán sometidos a congelación/liofilización o secado o bien para obtener vegetales mínimamente procesados (Chiralt et al., 2001), puesto que ofrece numerosas ventajas, tales como: la disminución de la actividad de agua del alimento; la retención de compuestos nutricionales y responsables del aroma, color y sabor; la incorporación de sustancias conservadoras y agentes que mejoren la textura y el sabor, etc.; el requerimiento de equipamiento simple, el bajo consumo de energía; etc. (Sablani y Raman, 2003).

La DO involucra la remoción parcial del agua de un alimento por inmersión del mismo en soluciones acuosas concentradas de glúcidos, sales y especias. Durante el mismo, se producen

tres tipos de transferencia de masa en contracorriente: flujo de agua desde el producto a la solución osmótica; transferencia de solutos desde la solución al producto y flujo de solutos (azúcares, ácidos orgánicos, vitaminas, minerales) desde el producto a la solución (Panagiotou et al., 1999; Sablani y Raman, 2003). Este último flujo no se considera en el modelado de la transferencia de materia puesto que se considera despreciable comparado con los otros dos flujos (Shi y Le Maguer, 2002).

Las variables más importantes que afectan la transferencia de masa que se produce durante la DO son: la concentración y la temperatura de la solución concentrada; la naturaleza y el peso molecular del soluto; el tipo y nivel de agitación; la presión, la relación de masa entre el producto y la solución; el tiempo de inmersión; la porosidad, el grado de madurez y la geometría del material a deshidratar (van Nieuwenhuijzen et al., 2001). Existen numerosas publicaciones que describen la influencia de estas variables sobre las velocidades de transferencia de masa y se han desarrollado modelos empíricos, semi-empíricos y mecanísticos, para predecir la cinética del proceso (Azuara et al., 1992; Peleg, 1988; Palou et al., 1993; Sablani y Raman, 2003; Kaymak-Ertekin y Sultanoğlu, 2000). Sin embargo, es difícil desarrollar de modelos matemáticos capaces de considerar, adecuadamente, todas las variables involucradas en el proceso y su influencia.

Dentro de los modelos empíricos, el de Peleg (Peleg, 1988) y el de Azuara et al. (Azuara et al., 1992) se utilizan con frecuencia para describir el mecanismo de la DO de frutas y hortalizas.

El modelo de Peleg corresponde a un modelo empírico, de dos parámetros, utilizado, en un principio, para describir la cinética de la absorción de humedad de leche en polvo y de granos de arroz (Peleg, 1988). Se ha utilizado para modelar las isoterms de sorción de diferentes alimentos (García-Pascual et al., 2006; Lee et al., 2006; Planinic et al., 2005), las velocidades de deshidratación osmótica de frutas y vegetales (Azoubel y Murr, 2004; Palou et al., 1994; Park et al., 2002), de trozos de pollo (Schmidt et al., 2009) y de pescado (Corzo et al., 2007).

El modelo de Azuara et al., se basa en el ajuste de los datos experimentales a ecuaciones derivadas de los balances de masa para la pérdida de agua y para la ganancia de sólidos, las mismas requieren parámetros ajustables, que son constantes de velocidad relativas a las variables mencionadas (Azuara et al., 1992). Se utiliza para describir la velocidad de deshidratación y estimar, en el equilibrio la concentración de solutos, por ejemplo, en manzanas (Kaymak-Ertekin y Sultanoğlu, 2000); vegetales (Azoubel y Murr, 2004; Park et al., 2002) y pescados (Corzo et al., 2007).

El anco (*Cucurbita moschata*) es una hortaliza que se cultiva y consume ampliamente en México y países de América del Sur (Bisognin, 2002). Es un fruto rico en carotenoides, minerales, vitaminas B<sub>2</sub>, C y E, de bajo contenido energético y gran cantidad de fibra (de Escalada Pla et al., 2007). Se utiliza en la producción de diferentes alimentos tales como, cubos en almíbar, mermelada, jalea y purés (Gliemmo et al., 2009) o bien como ingrediente en alimentos preparados como pasteles, sopas, guisos, panes (Doymaz, 2007). La deshidratación osmótica puede utilizarse como un tratamiento previo a otros procesos de conservación o bien para obtenerlo como alimento mínimamente procesado, sin embargo, al respecto existe muy poca información bibliográfica (Goitía et al., 1998; Castilho García et al., 2007; Gliemmo et al., 2009).

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Preparación de las muestras

Se trabajó con ancos obtenidos en el mercado local. En el laboratorio, se lavaron, pelaron y cortaron en cubos de 0,5; 1 y 1,5 cm de espesor. Las muestras, inicialmente pesadas, se colocaron en canastas de malla metálica diseñadas especialmente para las experiencias. Las canastas

se sumergieron en solución de sacarosa de 55°Bx contenida en un baño termostatzado a 30°C, con agitación forzada. El volumen de la solución fue lo suficientemente elevado como para impedir su dilución por el flujo de agua proveniente del producto.

Se extrajeron muestras al cabo de 0,5, 1, 2, 3, 5 y 8 horas de tratamiento y los ensayos se realizaron por triplicado.

### 2.2 Determinaciones analíticas

Las muestras, previamente pesadas en balanza analítica, fueron sometidas a deshidratación osmótica. Al cabo de los tiempos preestablecidos, se extrajo una muestra representativa, los cubos se lavaron ligeramente con agua destilada, se secaron con papel absorbente.

La pérdida de agua (WL) y la ganancia de sólidos (GS), referidas a base húmeda, se determinaron gravimétricamente. Para determinar el contenido de sólidos totales, los cubos se trituraron y secaron en estufa de vacío a 60°C, hasta peso constante.

Estos parámetros, expresados como g de agua/100 g de muestra inicial y g de sólidos totales/100 g de muestra inicial, respectivamente, se calcularon mediante las ecuaciones (1) y (2).

$$WL = \frac{m_{wi} - (m_f - m_{sf})}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

$$GS = \frac{m_{sf} - m_{si}}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

donde,  $m_{wi}$ : masa inicial de agua;  $m_i$ : masa inicial de la muestra;  $m_f$ : masa de muestra osmotizada al tiempo  $t$ ;  $m_{sf}$ : masa de sólidos totales de la muestra osmotizada al tiempo  $t$ ;  $m_{si}$ : masa de sólidos totales iniciales.

Periódicamente, se verificó la concentración de sólidos solubles en la solución azucarada utilizándose un refractómetro de mano.

### 2.3 Modelado matemático y tratamiento estadístico

Los datos experimentales del proceso de deshidratación osmótica, correspondientes a la pérdida de agua y la ganancia de sólidos, se ajustaron al modelo matemático establecido por Peleg (1988), utilizando las ecuaciones (3) y (4) establecidas, para la DO, por Palou et al. (1994).

$$\frac{t}{x_0^w - x_t^w} = k_{1,w} + k_{2,w}t \quad (3)$$

$$\frac{t}{x_t^s - x_0^s} = k_{1,s} + k_{2,s}t \quad (4)$$

donde:  $(x_0^w - x_t^w)$  corresponde a WL,  $(x_t^s - x_0^s)$  es GS;  $k_{1,w}$  y  $k_{2,w}$  y  $k_{1,s}$  y  $k_{2,s}$ : constantes relativas a la pérdida de agua y a la ganancia de sólidos, respectivamente y  $t$  el tiempo de tratamiento. La constante  $k_1$  se denomina constante de velocidad y  $k_2$  es la constante de capacidad. Los datos experimentales también se ajustaron al modelo de Azuara et al. (1992), mediante las ecuaciones (5) y (6).

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{s_1 WL_\infty} + \frac{t}{WL_\infty} \quad (5)$$

$$\frac{t}{GS} = \frac{1}{s_2 GS_\infty} + \frac{t}{GS_\infty} \quad (6)$$

donde: donde WL,  $WL_\infty$  y GS,  $GS_\infty$ : pérdida de agua y ganancia de sólidos en un tiempo  $t$  y en el equilibrio, respectivamente;  $s_1$  y  $s_2$ : constantes de velocidad relativas a la pérdida de agua y a la ganancia de sólidos, respectivamente. Se calculó la media y la desviación estándar de los datos y el ajuste entre los valores predichos y los experimentales se analizó utilizando el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

### 3 RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los parámetros cinéticos y estadísticos del ajuste al modelo de Peleg, de los datos experimentales obtenidos para la pérdida de agua experimentada por cubos de anco de distintos espesores sumergidos en solución de sacarosa de 55°Bx.

En el modelo de Peleg se observa que la constante de velocidad aumenta con el espesor, mientras que la constante de capacidad se modifica escasamente.

En el modelo de Azuara et al., la constante de velocidad disminuye con el espesor del cubo; la pérdida de agua a tiempo infinito es igual para cubos pequeños, mientras que disminuye para cubos de 1,5 cm.

Los coeficientes de correlación indican un muy buen ajuste entre los datos experimentales y los modelos utilizados. No existen diferencias significativas en el ajuste de los datos experimentales a los dos modelos, los  $R^2$  son iguales, así como también los valores de RMSE.

En las Fig. 1 y 2 se representan los valores predichos por cada modelo frente a los experimentales.

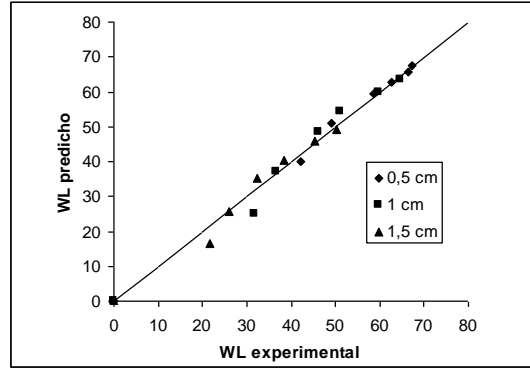


Figura 1. Ajuste entre los valores de WL experimentales y predichos por el modelo de Peleg para cubos de anco de 0,5; 1 y 1,5 cm de espesor

En ambos modelos, la capacidad de ajuste es muy buena, observándose, para los valores iniciales de WL una pequeña dispersión alrededor de la recta de 45° (pendiente igual a 1).

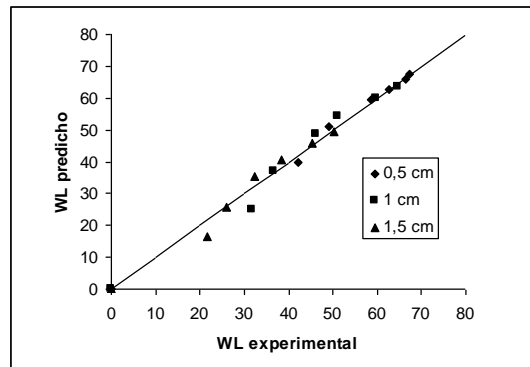


Figura 2. Ajuste entre los valores de WL experimentales y predichos por el modelo de Azuara et al. para cubos de anco de 0,5; 1 y 1,5 cm de espesor

Los parámetros cinéticos y estadísticos del ajuste de los datos experimentales obtenidos para la ganancia de sólidos a los dos modelos estudiados, se indican en la Tabla 2.

Tanto la constante de velocidad como la constante de capacidad del modelo de Peleg aumentan con el espesor. Sin embargo, para el segundo modelo, la constante de velocidad aumenta ligeramente con el espesor pero disminuye para cubos de mayor tamaño y mientras que la ganancia de sólidos en el equilibrio disminuye progresivamente con el espesor. Los coeficientes de correlación indican un muy buen ajuste entre los datos experimentales y los modelos aplicados, ambos son iguales, lo mismo ocurre con RMSE.

Tabla 1. Parámetros cinéticos y estadísticos de la pérdida de agua de acuerdo con el modelo de Peleg y el de Azuara et al.

Espesor (cm)	Modelo de Peleg				Modelo de Azuara et al.			
	$k_{1,w}$ (h(g/100 g) <sup>-1</sup> )	$k_{2,w}$ (g/100 g) <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	S <sub>1</sub> (h <sup>-1</sup> )	WL <sub>∞</sub> (g agua/100g muestra)	R <sup>2</sup>	RMSE
0,5	0,0055	0,0141	0,9997	1,3510	2,5636	70,9219	0,9997	1,3510
1,0	0,0130	0,0141	0,9951	3,2594	1,0846	70,9219	0,9951	3,2595
1,5	0,0213	0,0176	0,9918	2,5865	0,8263	56,8182	0,9918	2,5865

Tabla 2. Parámetros cinéticos y estadísticos de ganancia de sólidos para el modelo de Peleg y de Azuara et al.

Espesor (cm)	Modelo de Peleg				Modelo de Azuara et al.			
	$k_{1,s}$ (h(g/100 g) <sup>-1</sup> )	$k_{2,s}$ (g/100 g) <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	S <sub>2</sub> (h <sup>-1</sup> )	GS <sub>∞</sub> (g sól./100g muestra)	R <sup>2</sup>	RMSE
0,5	0,0503	0,1152	0,9972	0,4500	2,2903	8,6806	0,9972	0,4500
1,0	0,0632	0,1564	0,9946	0,2926	2,4747	6,3939	0,9946	0,2926
1,5	0,0934	0,2110	0,9956	0,2219	2,2591	4,7393	0,9956	0,2219

Las Fig. 3 y 4 muestran la bondad del ajuste entre los valores predichos por cada modelo frente a los experimentales.

La capacidad de ajuste, para ambos modelos, es muy buena. Los datos experimentales se agrupan alrededor de la recta de pendiente igual a 1.

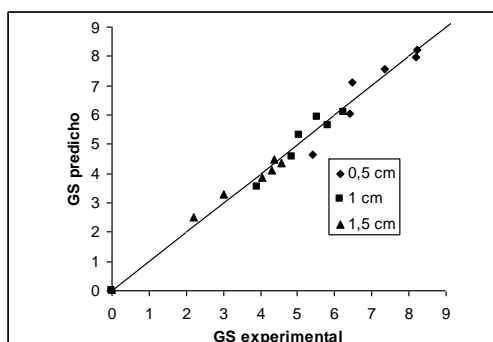


Figura 3. Ajuste entre los valores de GS experimentales y predichos por el modelo de Peleg

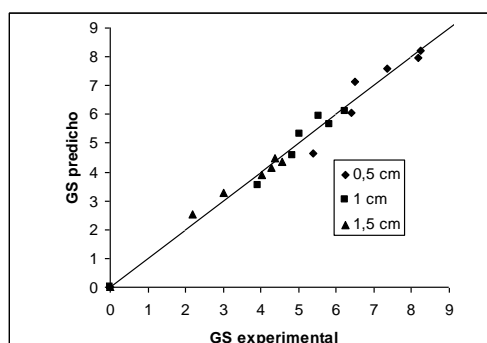


Figura 4. Ajuste entre los valores de GS experimentales y predichos por el modelo de Azuara et al.

#### 4 CONCLUSIONES

Se han desarrollado numerosos modelos matemáticos para representar el proceso de DO. Los modelos de Peleg y de Azuara et al., están limitados al rango de las condiciones experimentales y de variables de proceso. Por ello, los parámetros de ajuste se deben determinar para cada conjunto de condiciones. Ambos modelos representan muy bien la transferencia de masa que se produce en cubos de anco sumergidos en solución de sacarosa de 55°Bx. Tienen la ventaja de permitir la predicción de la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en el equilibrio, además la capacidad de ajuste es muy buena. En las condiciones de estudio es indistinto ajustar los datos experimentales de transferencia másica a uno u otro modelo.

#### 5 REFERENCIAS

- Azoubel, P.M. & F.E.X. Murr, Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato, *Journal of Food Engineering*, 61, 291–295, 2004.
- Azuara, E., C.I. Beristain & H.S. García, Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration, *Journal of Science and Technology*, 29, 239–24, 1992.
- Bisognin, D.L., Origin and evolution of cultivated cucurbits, *Ciência Rural*, 32, 715–723, 2002.
- Castilho Garcia, C., M.A. Mauro & M.M. Kimura, Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*),

- Journal of Food Engineering*, 82, 284–291, 2007.
- Corzo, O., N. Bracho, J. Rodríguez & M. González, Predicting the moisture and salt contents of sardine sheets during vacuum pulse osmotic dehydration, *Journal of Food Engineering*, 80, 781–790, 2007.
- de Escalada Pla, M., N. Ponce, C. Stortz, L. Gerschenson & A. Rojas, Composition and functional properties of enriched fiber products obtained from pumpkin (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poiret). *LWT - Food Science and Technology*, 40, 1176–1185, 2007.
- Doymaz, I., The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*, 79, 243–248, 2007.
- García-Pascual, P., N. Sanjuán, R. Melis & R. Mulet, *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modeling, *Journal of Food Engineering*, 72, 346–353, 2006.
- Gliemmo, M.F., M.E. Latorre, L.N. Gerschenson & C.A. Campos, Color stability of pumpkin (*Cucurbita moschata*, Duchesne ex Poiret) puree during storage at room temperature: Effect of pH, potassium sorbate, ascorbic acid and packaging material, *LWT - Food Science and Technology*, 42, 196–201, 2009.
- Goitía, A.E., A.G. Qüesta, E. Raña, S. del C. Rodríguez & V. M. Cesca, Aplicación de la DO a productos frutihortícolas, *III Jornadas de investigación de la Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria*, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, 1998.
- Kaymak-Ertekin, F. & M. Sultanoğlu, Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples, *Journal of Food Engineering*, 46, 243–250, 2000.
- Lee, K.T., M. Farid, & S.K. Nguang, The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits, *Journal of Food Engineering*, 72, 16–23, 2006.
- Palou, E., A. López-Malo, A. Argai & J. Welti, The use of Peleg's equation to model osmotic concentration of papaya, *Drying Technology*, 12, 965–978, 1994.
- Panagiotou, N.M., V.T. Karathanos & Z.B. Maroulis, Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits, *Drying Technology*, 17, 175–189, 1999.
- Park, K.J., A. Bin, F.P.R. Brod & T.H.K.B. Park, Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.), *Journal of Food Engineering*, 52, 293–298, 2002.
- Peleg, M., An empirical model for the description of moisture sorption curves, *Journal of Food Science*, 55, 1084–1087, 1988.
- Planinic, D., S.T. Velic, M. Bilic & A. Bucic, Modelling of drying and rehydration of carrots using Peleg's model, *European Food Research and Technology*, 221, 446–451, 2005.
- Sablani, S.S. & M.S. Rahman, Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango, *Food Research International*, 36, 65–71, 2003.
- Sachetti, G., A. Gianotti & M. Dalla Rosa, Sucrose-salt combined effects on mass transfer kinetics and product acceptability. Study on apple osmotic treatments, *Journal of Food Engineering*, 49, 163–173, 2001.
- Schmidt, F.C., B.A.M. Carciofi & J.B. Laurindo, Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts, *Journal of Food Engineering*, 91, 553–559, 2009.
- Shi, J. & M. Le Maguer, Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects, *Food Reviews International*, 18, 305–335, 2002.
- van Nieuwenhuijzen, N.H., M.R. Zareifard & H.S. Ramaswamy, Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes, *Drying Technology*, 19, 525–545, 2001.