



Propuesta de mejora del Modelo de Azuara: Aplicación en la cinética de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de anchoveta (*Engraulis ringens*) y su optimización

Azuara's Model improvement proposal: validation in the mass transfer kinetics during osmotic dehydration of anchovy (*Engraulis ringens*) and its optimization

Joe Jara^{1,*}; Raúl Siche² ; Robert Jara³ ; Johonathan Salazar-Campos⁴

¹ Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional Autónoma de Chota. Colpa Huacariz, Chota, Cajamarca Perú.

² Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú.

³ Departamento de Ciencias, Universidad Privada Del Norte, Mz. G Lote 24 Urb. Dean Saavedra – Trujillo, Perú.

⁴ Centro de Experimentación e Investigación, Vicepresidencia de Investigación, Universidad Nacional Autónoma de Chota, Jr. José Osorio 418 - Chota, Cajamarca, Perú.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue proponer una mejora al Modelo de Azuara y compararlo con otros modelos en la predicción de la cinética de transferencia de masa en la deshidratación osmótica (DO) de trozos de Anchoveta (*Engraulis ringens*), utilizando como agente deshidratante cloruro de sodio (NaCl) y un delineamiento compuesto central rotacional (DCCR) de 4 variables-independientes. Se utilizaron los modelos matemáticos de Crank, Azuara y un modelo polinómico alternativo. Este último predijo la ganancia de NaCl al 93,6% y pérdida de humedad al 90,4% respectivamente, permitiendo optimizar la osmodeshidratación de: 5 a 7 °C de la solución, 3,0 a 3,5 la relación solución-producto, 14% a 16% la concentración de NaCl en la solución, y de 200 y 250 min la inmersión, para obtener concentraciones entre 5,94% y 6,46% de NaCl y humedades entre 68,76% y 67,52%. La difusividad efectiva fue de $2,63 \times 10^{-10}$ m²/s para el NaCl y de $4,35 \times 10^{-10}$ m²/s para la pérdida de humedad. El modelo de Azuara mejorado logra mejorar el nivel predictivo con una ganancia de NaCl (R²: 94,2%), y reducir el contenido de humedad final (R²: 72,4%), por lo tanto, aplicar este modelo es eficiente para predecir la cinética de transferencia de masa en la deshidratación osmótica.

Palabras clave: Modelos predictivos; modelo de Azuara modificado; deshidratación osmótica; cinética de transferencia.

ABSTRACT

The aim of this research was to propose an improvement to the Azuara Model and to compare it with other models in the prediction of the kinetics of mass transfer in osmotic dehydration (DO) of pieces of Anchovy (*Engraulis ringens*), using as dehydrating agent sodium chloride (NaCl) and a central rotational compound delineation (CRCD) of 4 independent variables. The mathematical models of Crank, Azuara and an alternative polynomial model were used. The latter predicted the gain of NaCl at 93.6% and moisture loss at 90.4%, respectively, allowing to optimize osmodehydration of: 5 to 7 °C of the solution, 3.0 to 3.5 the solution-product ratio, 14% to 16% the concentration of NaCl in the solution, and 200 and 250 min the immersion, to obtain concentrations between 5.94% and 6.46% of NaCl and humidity between 68.76% and 67.52%. The effective diffusivity was 2.63×10^{-10} m²/s for NaCl and 4.35×10^{-10} m²/s for moisture loss. The improved Azuara model manages to improve the predictive level with a NaCl gain (R²: 94.2%) and reduce the final moisture content (R²: 72.4%), therefore, applying this model is efficient for predict mass transfer kinetics in osmotic dehydration.

Keywords: Predictive models; modified Azuara model; dehydration; osmotic; transfer kinetics.

1. Introducción

Existen varios procesos de preservación de alimentos basados en la reducción de agua disponible para los microorganismos y reacciones

químicas. Es sabido que la estabilidad y seguridad de los alimentos mejoran, si la actividad de agua decrece. Existen dos procesos utilizados en el proceso de deshidratación del pescado utilizando

sal: en sal seca, que consiste en aplicar la sal sobre el músculo, y en sal húmeda, que se efectúa con el uso de salmuera. Este segundo proceso está despertando el interés industrial, por permitir un fácil control, obteniendo un producto de mejor calidad. Este proceso es conocido como deshidratación osmótica (DO), y en algunos casos como deshidratación e impregnación por inmersión (Corrêa et al., 2016; Zhang et al., 2017). La DO ha cobrado gran interés debido a las bajas temperaturas de operación utilizadas, que evita el daño de productos termolábiles y además reduce los costos de energía para el proceso (Torreggiani, 1995; Zhao et al., 2012; Li et al., 2018), permitiendo reducir la humedad del producto manteniéndolo así más estable y con una vida útil más larga, evitando también el desarrollo de microorganismos que causen daño al producto final. También debido a su potencial aplicación en la industria de los alimentos, por lo que la DO debe ser utilizada como pretratamiento en procesos que efectivamente reduzcan la actividad de agua mejorando considerablemente la calidad del producto (Azoubel, 1999; Khan, 2012). Un aspecto importante en la DO es la cinética de la transferencia de masa de los principales componentes que intervienen, estando determinada por la presión osmótica diferencial inicial entre el alimento, el agente osmótico, la velocidad de difusión del agua y del soluto (Azuara et al., 1992; Vicente et al., 2012; Dermesonlouoglou et al., 2019), y estas velocidades de difusión están controladas usualmente por el transporte de humedad en el producto y por la estructura del alimento (Saputra, 2006; Yadav y Singh, 2014; Taşeri et al., 2018). Existen modelos matemáticos fundamentales y empíricos de diversos autores que permiten predecir la transferencia de masa en la DO y determinar la difusividad efectiva. Pero los modelos empíricos de ajuste son válidos, solamente, para las condiciones dadas; lo que significa que se requiere una expresión para cada conjunto de datos experimentales (Ochoa-Martínez y Ayala-Aponte, 2004; Maran et al., 2013; Assis et al., 2016; Rahman et al., 2018; Cichowska et al., 2019).

En una propuesta semejante, Reyes et al. (2005) estudiaron la DO de láminas de sardina mediante la metodología de superficies de respuesta utilizando como variables independientes la concentración y temperaturas (mediante DCCR) determinaron que a temperaturas entre 31,6 a 31,8 °C, una concentración entre 26 a 26,5% de NaCl, y a un tiempo de 245 min se obtiene máxima pérdida de humedad (0,26 g/g), mínima pérdida de peso (0,145 g/g) y máxima ganancia de sal (0,187 g/g).

El presente trabajo planteó estudiar la cinética de transferencia de masa en la DO de trozos en tubos de anchoveta, empleando como agente deshidratante NaCl, utilizando dos modelos matemáticos y generando un modelo polinómico; además evaluar los efectos de las variables independientes: concentración de soluciones de NaCl, temperatura, relación solución-producto y del tiempo, en el contenido de humedad final (%H), ganancia de NaCl, su difusividad efectiva (Def) y determinar sus condiciones óptimas.

2. Material y métodos

2.1. Materia prima

Se utilizó anchoveta (*Engraulis ringens*) capturada en Chimbote y transportada en cremolada al Instituto Tecnológico de la Producción con un tiempo de captura de 24 h. Se troceó cilíndricamente la anchoveta con dimensiones de 3.3 cm de largo y 2 de diámetro y de 1 cm al interior. El peso promedio de la muestra fue de 7,012 g y luego se la conservó en cooler, previamente acondicionado con agua y hielo en una proporción de 1:1:2 (pescado: agua: hielo), hasta su uso en el proceso de DO.

2.2. Descripción del proceso para la DO

Se colocaron 20 trozos de tubo de anchoveta, previamente secados en papel absorbente (15 min), fueron pesados y luego colocados en los beaker con la solución osmótica de NaCl según los tratamientos experimentales (Tabla 2). Estos beaker contenían una rejilla de acero inoxidable a 1,7 cm de altura con respecto a la exterior de la superficie de la solución. Pasado el tiempo de la DO, cada trozo se lavó con agua, se escurrió y se secó superficialmente, con papel absorbente para retirar la salmuera adherida. Luego se pesó y se le determinó el contenido de humedad y sal final.

2.3. Instalación experimental para la DO

El equipo de DO estuvo compuesto por un baño María y un sistema de refrigeración con bomba de recirculación, marca H.W. Kessel S.A. (Figura 1). El líquido utilizado como medio de transmisión de calor (calentamiento o refrigeración) entre el equipo y el exterior (producto a tratar) fue agua destilada o en solución con sal. Este líquido es recirculado por una bomba la cual permite mantener la temperatura constante del medio.

2.4 Diseño Experimental

Se utilizó un Delineamiento Compuesto Central Rotacional (DCCR) para cuatro (4) variables independientes ($2^4 + 2 \times 4 + 4$) que hacen 28 ensayos (Tabla 2).

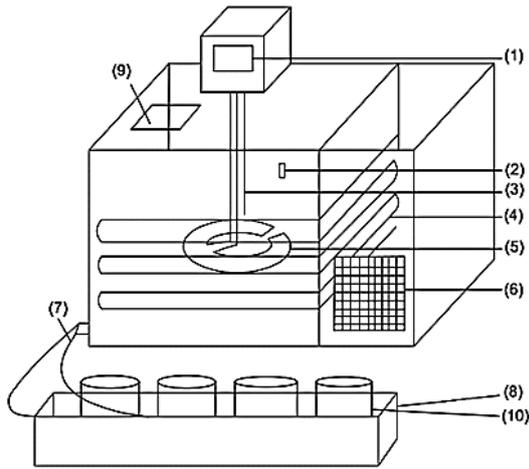


Figura 1. Esquema del equipo de baño maría y refrigerador con bomba de recirculación incluida: (1) panel de control, (2) interruptor de encendido del sistema de refrigeración, (3) sensor de temperatura, (4) tuberías de refrigeración, (5) resistencia, (6) rejilla de aeración del sistema de refrigeración, (7) mangueras de circulación, (8) recipiente de recirculación, (9) cámara termostática, (10) beaker de 1 L.

Las variables independientes fueron: concentración (10% a 30% de NaCl), relación solución-producto (1/1 a 10/1 p/p), tiempo de proceso (0 a 300 min) y la temperatura (5 a 25 °C). Las respuestas evaluadas fueron: porcentaje de humedad final, porcentaje de NaCl final y la D_e . Estas variables también se evaluaron en condición

de equilibrio donde el tiempo considerado fue de 8 h para todos los tratamientos. Se utilizó el software Minitab 16 en el desarrollo de los modelos: en Crank y Azuara se utilizó regresión lineal, donde la variable independiente es el tiempo, el resto de las variables se consideraron constante, y en el polinómico generado por superficie de respuesta se consideraron todas las variables (Tabla 1). Para seleccionar el mejor modelo de predicción se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y el error relativo medio (ERM):

$$ERM (\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|V_{exp} - V_{pred}|}{V_{exp}} \quad (1)$$

Donde V_{exp} : valores experimentales y V_{pred} : valores predichos y n : número de experimentos.

2.5. Análisis fisicoquímico

Humedad utilizando el método No. 925.09 AOAC (2005); Proteína cruda por método de Kjeldahl según el método LABS-ITP-FQ-001-98, Rev. 01. (ITP, 2000); Grasa cruda por extracción con Soxhlet según el método LABS-ITP-FQ-003-98, Rev.02. (ITP, 2000); Cenizas según 940.26 AOAC (1995); Cloruro de sodio según AOAC 971.27 (2005). Para la determinación del pH, se mezclaron 10 g de músculo y 90 mL de agua destilada usando un electrodo se verificó el pH metro con las soluciones buffer trazables a Nist.

Tabla 1

Modelos Matemáticos aplicados a la deshidratación osmótica de trozos de anchoveta en salmuera

Autor	Modelo de cinética	Cálculo de la Difusividad
Crank (1975)	$Y = \frac{Z_{wt} - Z_{w0}}{Z_{we} - Z_{w0}} = \frac{2Dt}{(b-a)^2 \text{Ln}(b/a)}$ $Y = K_1 + K_2 t$ $K_2 = \frac{2D}{(b-a)^2 \text{Ln}(b/a)}$	$D_e = \frac{(Y - K_1)(b-a)^2 \text{Ln}(b/a)}{2t}$
Azuara (1992)	$\frac{t}{\Delta M_t^w} = \frac{1}{s_2 \Delta M_\infty^w} + \frac{t}{\Delta M_\infty^w}$ $\frac{t}{\Delta M_t^{ss}} = \frac{1}{s_2 \Delta M_\infty^{ss}} + \frac{t}{\Delta M_\infty^{ss}}$ $Y = k_1 + k_2 t$ $\Delta M_t^w = \frac{M_0^0 x_0^w - M_t^0 x_t^w}{M_0^0}$ $\Delta M_t^{ss} = \frac{M_t^0 (1 - x_t^w) - M_0^0 (1 - x_0^w)}{M_0^0}$	$D_{e,ss} = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{s_2 l}{1 + s_2 t} \right) \left(\frac{\Delta M_\infty^{ss,mod}}{\Delta M_\infty^{ss,exp}} \right) \right]^2$ $D_{e,w} = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{s_1 l}{1 + s_1 t} \right) \left(\frac{\Delta M_\infty^{w,mod}}{\Delta M_\infty^{w,exp}} \right) \right]^2$ <p>D_e: difusividad efectiva (m^2/s); l: longitud característica (semiespesor, m); M: masa (kg); ΔM: pérdida (o ganancia) de masa (kg); t: tiempo (seg.); x: fracción másica del componente j en el alimento (kg componente / kg totales). <i>Superíndices utilizados</i>: J: genérico para un componente del alimento; $J=w$: agua; $J=ss$: sólidos solubles; $J=0$: masa total. <i>Subíndices utilizados</i>: 0: valor inicial; t: valor en un tiempo t; ∞: valor en el equilibrio.</p>
Polinómico Estadístico	$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_2 x_3$ <p>β_0: coeficiente de regresión de la constante; β_i: coeficiente de regresión que indica la importancia relativa del factor x_i (mide los efectos lineales); β_{ij}: coeficiente de regresión que indica la importancia relativa del factor x_i^2 (mide los efectos cuadráticos); β_{ijk}: coeficiente de regresión que indica la importancia relativa del factor $x_i x_j$ (mide los efectos combinados o de interacción de los factores x_i y x_j); y Y: respuesta ajustada.</p>	

Tabla 2

Contenido de humedad final (%H) y concentración de cloruro de sodio (%NaCl) obtenidos en la DO por DCCR

N° de tratamiento	Variables reales				Variables		Respuestas	
	C (p/p)	R p/p)	t (min)	T (°C)	%NaCl	%H	%NaCl _∞	%H _∞
1	15	3,25	75	10	4,12	69,73	8,55	65,45
2	25	3,25	75	10	6,82	65,29	12,37	58,68
3	15	7,75	75	10	4,97	69,38	8,86	64,87
4	25	7,75	75	10	6,94	65,03	12,88	56,93
5	15	3,25	225	10	6,12	68,73	8,55	65,45
6	25	3,25	225	10	9,03	63,1	12,37	58,68
7	15	7,75	225	10	6,58	66,92	8,86	64,87
8	25	7,75	225	10	9,92	61,94	12,88	56,93
9	15	3,25	75	20	5,28	65	9,14	61,26
10	25	3,25	75	20	7,22	61,7	13,13	57,38
11	15	7,75	75	20	5,58	64,83	9,66	61,33
12	25	7,75	75	20	8,31	60,32	14,35	53,74
13	15	3,25	225	20	6,77	63,7	9,14	61,26
14	25	3,25	225	20	10,17	57,61	13,13	57,38
15	15	7,75	225	20	7,85	61,02	9,66	61,33
16	25	7,75	225	20	12,01	57,55	14,35	53,74
17	10	5,5	150	15	4,5	67,98	5,81	56,93
18	30	5,5	150	15	9,03	61,09	12,20	54,74
19	20	1	150	15	6,77	63,83	8,10	63,28
20	20	10	150	15	8,02	62,09	11,35	58,52
21	20	5,5	0	15	0,14	72,45	10,58	58,63
22	20	5,5	300	15	9,5	60,88	10,58	58,63
23	20	5,5	150	5	7,83	62,3	10,29	59,48
24	20	5,5	150	25	9,45	59,61	12,70	56,53
25	20	5,5	150	15	8,44	62,43	10,58	58,63
26	20	5,5	150	15	8,42	63,01	10,58	58,63
27	20	5,5	150	15	8,68	62,4	10,58	58,63
28	20	5,5	150	15	8,55	62,7	10,58	58,63

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización fisicoquímica de anchoveta

Los cortes de anchoveta tenían 1,33% de grasas, 2,0 ± 0,13% de cenizas, 0,14 ± 0,01% de NaCl, 6,44 ± 0,02 de pH, 72,5 ± 0,98% H, 19,6±0,39% de proteínas. Según la clasificación de Pigott y Tucker (1996) la anchoveta es clasificada como un pescado grasoso.

3.2. Resultado de la deshidratación osmótica

En la Tabla 2 se observa que el valor máximo de NaCl (12,01%) y mínimo de humedad (57,55%) se produce a 25% NaCl, relación solución/producto de 7,75, 20 °C y 225 min (tratamiento 16). La combinación con valores más altos de las variables independientes corresponde a la muestra inicial (tratamiento 21). Los valores de los centrales son parecidos con valor promedio de 8,52 ± 0,12%NaCl y 62,64 ± 0,28%H.

3.3. Análisis de los modelos matemáticos

Modelo matemático de Crank

El modelo ajustado para la cinética transferencia de masa se presenta en la ecuación 2, con un R² igual de 0,635 y una correlación 0,797, donde sus coeficientes de regresión son significativos:

$$Y = 0,382 + 0,000032t \quad (2)$$

El modelo matemático para la difusividad y la difusividad efectiva para las condiciones y resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Modelo matemático de Azuara

El modelo matemático ajustado para la cinética de transferencia de masa del NaCl es la que se presenta en la ecuación 3 con un R² de 0,673 y correlación 0,82. El coeficiente de regresión lineal es significativo:

$$\frac{t}{\Delta M_t^{ss}} = 281,52 + 0,1026t \quad (3)$$

De donde:

$$\Delta M_{\infty}^{ss} = 9,7466\%$$

$$s_2 = 0,00036445$$

$$\Delta M_{\infty \text{exp}}^{ss} = 10,64$$

La cinética de transferencia masa del agua es modelada mediante regresión lineal y se presentada en la ecuación 4, la cual tiene un R² de 0,309 y correlación 0,556. El coeficiente de regresión lineal es significativo:

$$t / \Delta M_t^w = 272 + 0,0936 t \quad (4)$$

Donde:

$$\Delta M_{\infty, \text{exp}}^w = 13,15\%$$

$$s_1 = 0,00367037$$

$$\Delta M_{\infty}^w = 10,5263$$

El modelo matemático para predecir la difusión efectiva del NaCl y agua reemplazando los valores anteriores y su difusividad efectiva media, para los resultados de DCCR trabajado, se muestran en la [Tabla 4](#).

Modelo matemático polinómico

El modelo ajustado de la variable % NaCl y %H analizada en el proceso de DO, con un R² de 0,936 y 0,904 respectivamente se presentan en la [ecuación 5](#) y [6](#). Mostrando los efectos lineales, cuadráticos y las interacciones de las variables independientes significativas sobre la variable respuestas.

$$\begin{aligned} \% \text{NaCl} = & -5,87 + 0,65xC - 0,015xC^2 - 0,04xR^2 \\ & + 0,044xt - 0,00015xt^2 - 0,19xT + 0,0042xT^2 \\ & + 0,00074xtxC + 0,00071Rxt + 0,011RxT \\ & + 0,00027xtxT \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \%H = & 88,61 - 1,26xC - 0,052xt + 0,02xC^2 \\ & + 0,0002xt^2 - 0,016xT^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Donde C es la concentración inicial de la solución (%); R la relación solución- producto del proceso; t el tiempo del proceso (min) y T la temperatura de la solución (°C).

Debido a que este modelo no contempla un modelo para determinar la difusividad, se ha optado por determinarla utilizando el modelo matemático de Azuara, ya que este presenta el mejor ajuste entre los valores experimentales y predichos ([Tabla 4](#)).

Modificación del modelo de Azuara

Se plantea aquí una modificación al modelo matemático de Azuara, teniendo como parámetro independiente a $t / \Delta M_{\infty}^i$, en lugar de t. Esta modificación permitió predecir mejor el comportamiento de ganancia de NaCl y la pérdida de agua con un coeficiente de regresión (R²: 94,2 y 72,4% respectivamente) muy superior al modelo matemático original (R²: 67,3% y 30,9%, respectivamente) y que el modelo matemático de Crank (R²: 63,5%).

A continuación, se presenta el modelo matemático de Azuara modificado generalizado ([ecu. 7](#)):

$$Y = k_1 + k_2 \frac{t}{\Delta M_{\infty}^i} \quad (7)$$

Donde k₁ es el coeficiente dimensional (seg.% NaCl o H₂O) y k₂ es el coeficiente adimensional.

La cinética de transferencia masa del NaCl es modelada mediante regresión lineal y presentada en la [ecuación 8](#). Los coeficientes de regresión son significativos sobre la variable de respuesta.

$$\frac{t}{\Delta M_t^{ss}} = 205,17 + 1,1346 \times \frac{t}{\Delta M_{\infty}^{ss}} \quad (8)$$

El modelo matemático para predecir la difusión efectiva del NaCl y la difusividad efectiva media para los resultados del delineamiento central compuesto rotacional, se muestran en la [Tabla 4](#).

Cinética de la transferencia de masa del agua

La cinética de transferencia masa del agua es modelada mediante regresión lineal y presentada en la [ecuación 9](#). El coeficiente de regresión lineal es significativo sobre la variable respuesta.

$$\frac{t}{\Delta M_t^w} = 91,119 + 1,3859 \frac{t}{\Delta M_{\infty}^w} \quad (9)$$

El modelo matemático para predecir la Def del agua y la difusividad efectiva media para los resultados del DCCR, se muestran en la [Tabla 4](#).

Tanto el modelo de Crank como el modelo de Azuara están en función solamente del tiempo, mas no de las otras variables. Por el contrario, el modelo modificado de Azuara contempla además del tiempo, la ΔM en el equilibrio, la cual está influenciada por las condiciones de las otras variables independientes (temperatura, relación solución/producto y la concentración) que tienen su efecto en la variable dependiente, y por ende la predicción del valor de estas (%NaCl, %H), tal como se demuestra en esta investigación, en comparación con los modelos anteriormente mencionados.

Estudio comparativo de los modelos predictivos

De los tres modelos matemáticos utilizados, el polinómico es el que mejor predice la ganancia de cloruro de sodio (R²: 90,4%) y la pérdida de humedad (R²: 93,6%) ([Tabla 3](#)). A la vez presenta el valor de error relativo medio más bajo (5% para la % NaCl y 1,3 para % H). Esto indica que el modelo polinómico obtenido vía metodología de superficie de respuesta se ajusta mejor a los datos experimentales. [Cheng et al. \(2014\)](#), al deshidratar osmóticamente al vacío filete de Bonito (*sarda sarda*) obtuvo un modelo polinómico estadístico con un R² de 0,954 para el contenido de humedad final y 0,959 para el contenido final de NaCl. Valores muy próximos a los obtenidos en

este trabajo con un modelo polinómico. Reyes et al. (2005), obtuvo modelos polinómicos para la pérdida de agua, pérdida de peso y ganancia de sal, que experimentaron las láminas de sardina como consecuencia del tratamiento osmótico y utilizando la metodología de superficie de respuesta (98,49, 97,42 y 99,40% de la variabilidad en la pérdida de agua, pérdida de peso y ganancia de sal, respectivamente).

Tabla 3

Valores de los R² y error relativo medio (ERM) de los modelos matemáticos predictivos

Modelo matemático	R ²		ERM (%)	
	%NaCl	%H	%NaCl	%H
Crank	0,635	0,635	48,77	8,42
Azuara	0,673	0,309	17,48	33,10
Azuara modificado	0,942	0,724	7,81	19,00
Polinómico	0,904	0,936	5,05	1,30

Tanto el modelo de Crack, como el de Azuara presentan valores de error relativo medio más altos, indicando el bajo ajuste que existe entre los valores predichos y los experimentales, debido a que ellos incluyen en sus modelos sólo como variable el tiempo y en esta investigación se incluyen además la temperatura, relación solución/producto y concentración.

Finalmente, como una forma de mezclar el diseño experimental aplicado aquí (DCCR) y el Modelo de Azuara, en este trabajo se plantea una modificación al modelo matemático de Azuara. Esta modificación permite ajustar mucho mejor el comportamiento de ganancia de NaCl (R²: 94,2%) y pérdida de agua (R²: 72,4%). Sin embargo, deben realizarse más investigaciones con otras especies utilizando el modelo modificado de Azuara para validarlo.

3.4. Análisis por superficies de respuesta Ganancia de cloruro de sodio

En la Figura 2a se presenta la superficie de respuesta y curvas de nivel de evolución de NaCl en la estructura muscular de la anchoveta, en función de la variable concentración de salmuera y relación solución-producto manteniendo el resto de las variables independientes constantes. Para mayores valores de concentración de NaCl, el contenido en la estructura muscular de la anchoveta aumenta desde un valor mínimo de 3 a 10,1%. Por otro lado, se observa que conforme aumenta la variable relación solución-producto hasta 7,75, al mantener constante la variable concentración, incrementa levemente el contenido de NaCl en el músculo del pescado para luego decrecer conforme sigue aumentando el valor de esta variable.

Se observa que, a mayor concentración de la solución y tiempo de procesamiento, el contenido de cloruro de sodio en el músculo del pescado aumenta desde un valor mínimo de 2% a 10% (Figura 2b).

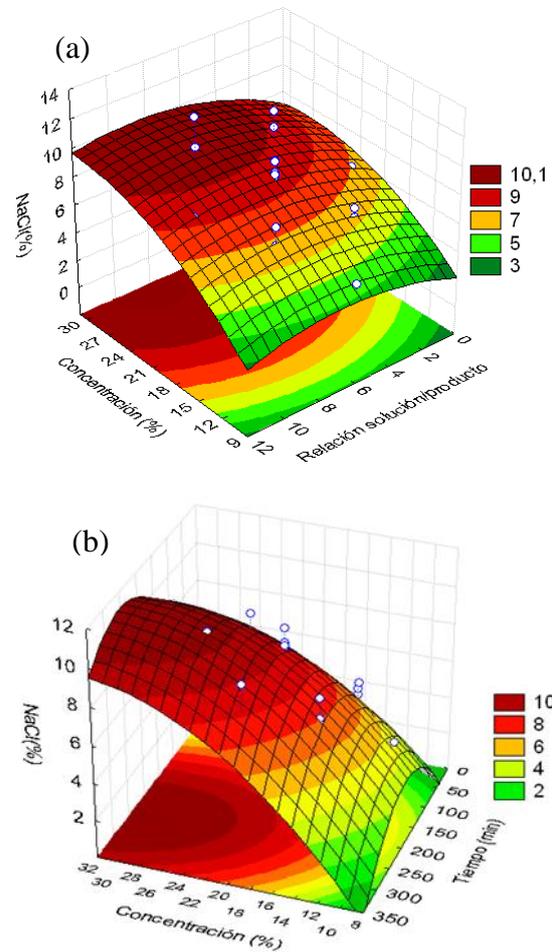


Figura 2. Superficie de respuesta para ganancia de sal (%NaCl): (a) en función de la concentración de la solución (%NaCl) y relación solución-producto y (b) en función de la concentración de la solución (%NaCl) y el tiempo de inmersión.

A concentraciones bajas en los primeros minutos del proceso el contenido de cloruro de sodio en el músculo del pescado es relativamente bajo. Al trabajar con tiempos pequeños (50 min aproximadamente) el incremento del contenido de NaCl en la muestra es imperceptible, para luego ir incrementándose conforme aumenta el tiempo de inmersión y la concentración de solución. Geninasoto et al. (2001) el empleo de altas concentraciones de soluciones osmóticas permite que los efectos de deshidratación e impregnación sean más pronunciados.

En la Figura 3a se presenta la superficie de respuestas y curvas de nivel del contenido de NaCl de las variables concentración de sal de la solución y temperatura de inmersión manteniendo

el resto de las variables constantes, se puede observar que a mayor concentración de la solución y manteniendo la temperatura constante, el contenido de cloruro de sodio (%NaCl) en el músculo del pescado aumenta desde un valor mínimo de 4 a 10%. Por el contrario, al mantener la concentración de la solución por debajo del 10% de NaCl y al incrementar la temperatura el contenido de cloruro de sodio en el músculo de pescado no se ve muy afectado.

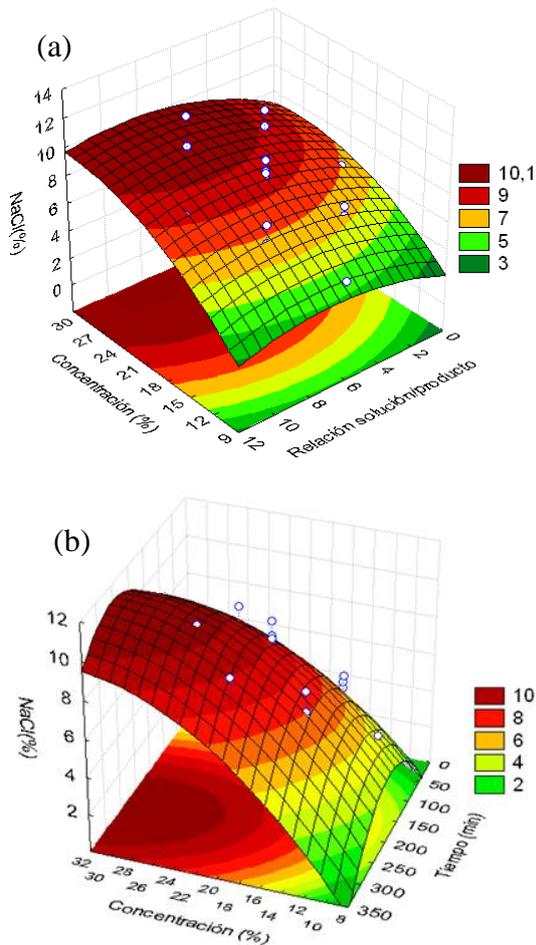


Figura 3. Superficie de respuesta para la ganancia de sal (%NaCl): (a) en función de la concentración de la solución (%NaCl) y la temperatura y (b) en función del tiempo de inmersión (min) y relación solución-producto.

En la Figura 3b se representa la superficie y curva de nivel para la ganancia del % NaCl como una función del tiempo y la relación solución-producto manteniendo el resto de las variables constantes se puede observar que a mayores valores de las variables independientes el contenido de NaCl presente en el músculo de la anchoveta también aumenta desde 2 a 8%. También en esta figura se puede percibir que a tiempos por debajo de los 75 minutos y diversos valores de la variable relación solución-producto el incremento del contenido no es tan relevante por el contrario al mantener

constante la relación solución-producto y conforme la variable tiempo aumenta, también aumenta el contenido de cloruro de sodio en la muestra.

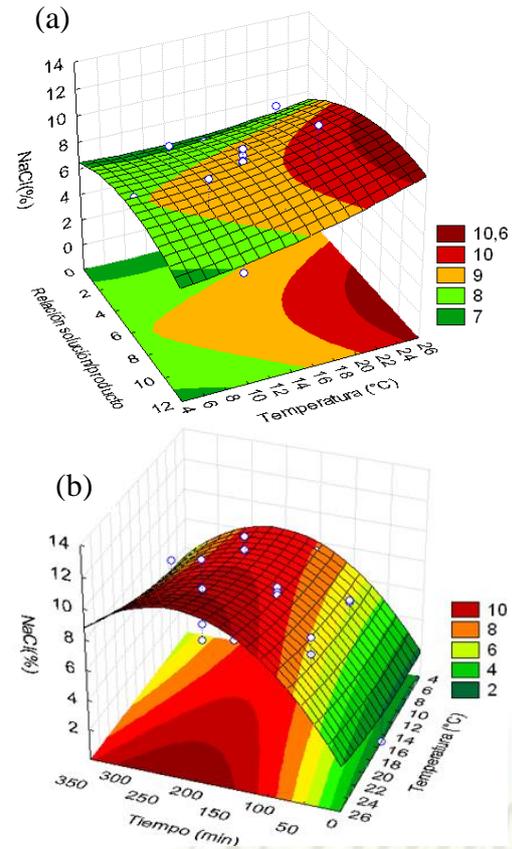


Figura 4. Superficie de respuesta para la ganancia de sal (% NaCl): (a) en función de la relación solución-producto y la temperatura y (b) en función del tiempo y la temperatura.

En la Figura 4a se representa la superficie de respuesta y curva de nivel para la ganancia % NaCl como función de la relación solución-producto y la temperatura, manteniendo el resto de las variables constantes. Se observa que a temperaturas por debajo de los 23 °C y relación solución-producto inferior a 2, no influyen en el incremento contenido de NaCl en el músculo del pescado; pero los porcentajes de cloruro de sodio en el músculo son elevados con un mínimo de 7% de origen de estas variables y un máximo de 10,6%. En la Figura 4b se presenta la superficie de respuestas y curvas de nivel del contenido de NaCl como función de la variable tiempo y la temperatura manteniendo el resto de las variables constantes (Van Nieuwnhuijzen et al., 2001; Yadav y Singh, 2014).

Contenido de humedad final

En la Figura 5a se muestra la superficie de respuesta y curva de nivel para el contenido de % H final como función de la concentración y la relación solución-producto manteniendo el resto

de las variables constantes. Se puede observar que a bajas concentraciones de sal en la solución el contenido de humedad en la muestra es elevado. Conforme aumenta esta concentración (hasta 24% aproximadamente), manteniendo constante la relación solución-producto, el contenido de humedad final dentro del músculo de la anchoveta se reduce notablemente desde un máximo de 72% y un mínimo de 62%.

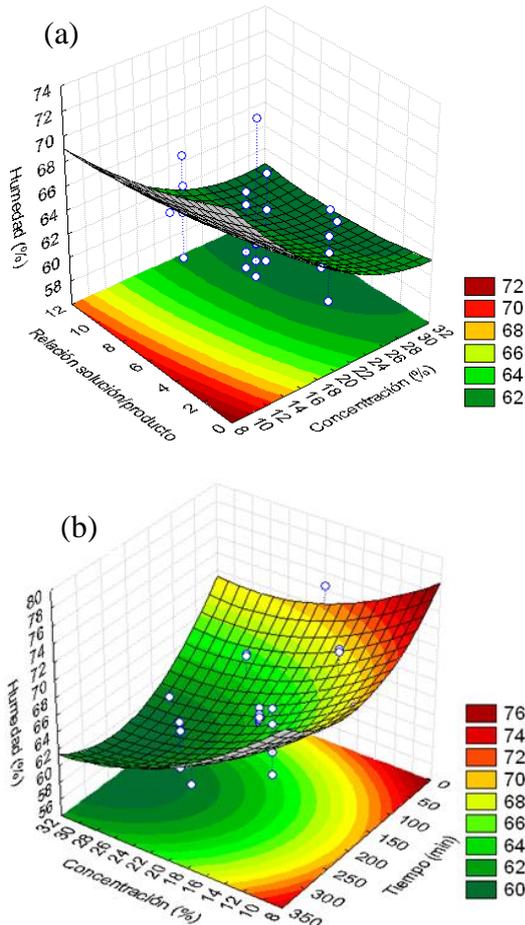


Figura 5. Superficie de respuesta para el contenido de humedad final (% H) (a) en función de la concentración y la relación solución-producto y (b) en función de la concentración y el tiempo.

En la **Figura 5b** se muestra la superficie de respuesta y curva de nivel para el contenido de % H final como función de la concentración y el tiempo manteniendo el resto de las variables constantes. Se observa que, a mayor concentración de la solución y temperatura, el contenido de % H final en el músculo del pescado disminuye desde 76 a 60% desde un rango de concentración 8 a 25% y un tiempo de 0 a 225 min. [Panagiotou et al. \(1998\)](#); [Estévez-Sánchez et al. \(2019\)](#) indican que la pérdida de agua es directamente proporcional a la concentración de la disolución y el tiempo de inmersión.

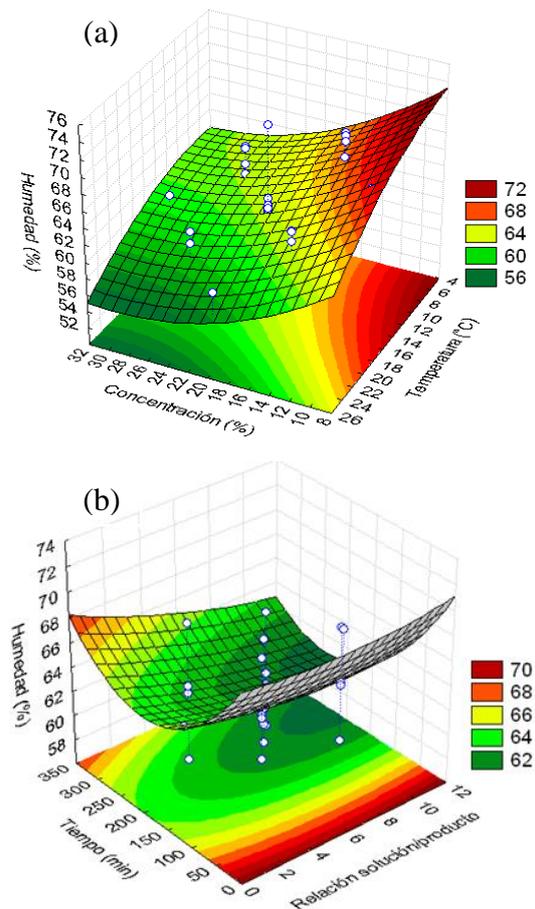


Figura 6. Superficie de respuesta para el contenido de humedad final (%H): (a) en función de la concentración y la temperatura y (b) en función del tiempo y la relación solución-producto.

En la **Figura 6a** se muestra la superficie de respuesta y curva de nivel para el contenido de % H como función de la concentración y la temperatura, manteniendo el resto de las variables constantes. [Ochoa-Martínez y Ayala-aponte \(2004\)](#), expresa que la temperatura constituye un parámetro importante sobre la cinética de deshidratación osmótica, ya que temperaturas más altas proporcionan un aumento de velocidad de transferencia de masa. Tal como se observa en la figura, la influencia e interacción de las dos variables es muy buena y positiva, con respecto a la pérdida de humedad. A mayor concentración y temperatura, los valores de contenido de humedad final disminuyen desde 72 a 56%.

En la **Figura 6b** se muestra la superficie de respuesta y curva de nivel para el contenido de % H como función de las variables tiempo y relación solución-producto, manteniendo el resto de las variables constantes. Una vez más la variable tiempo muestra su gran influencia en los procesos de impregnación y DO del trozo de tubo de anchoveta, en forma directa y proporcional a la

pérdida de humedad y ganancia de sólido. Esto está de acuerdo con los estudios realizados por otros autores. Lo contrario sucede con la variable relación solución-producto, la cual muestra su baja significancia en el proceso osmótico.

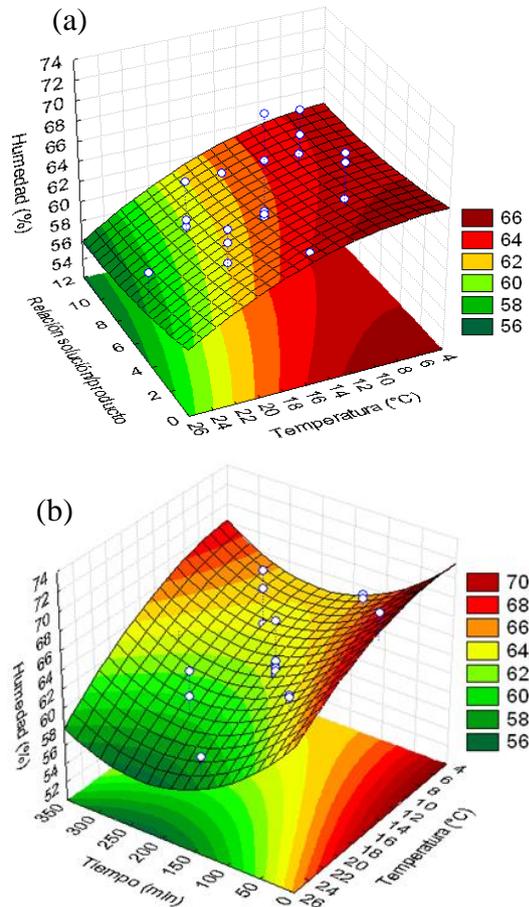


Figura 7. Superficie de respuesta para el contenido de humedad final (% H): (a) en función de la relación solución-producto y la temperatura y (b) en función del tiempo y temperatura.

En la Figura 7a se muestra la superficie de respuesta y curva de nivel para el contenido de humedad final como función de la variable relación solución-producto y temperatura, manteni-

do el resto de las variables constantes. La influencia de la variable temperatura es significativa, de allí que si se mantiene constante la variable relación solución-producto y conforme aumenta la temperatura del proceso la deshidratación es mayor y por ende la pérdida de humedad aumenta. La influencia de la variable relación solución-producto es baja.

En la Figura 7b se muestra la superficie de respuesta y curva de nivel para el contenido de humedad final como función de la variable tiempo y temperatura, manteniendo el resto de las variables constantes. Se observa que, a mayor tiempo y temperatura, disminuye la humedad en el músculo, desde 70% a 56% (de 0 a 225 min). Cuanto mayor es el efecto de estas variables, menor será el valor de la respuesta.

3.5. Optimización

Para realizar la optimización por la metodología de múltiples respuestas, se requiere considerar las restricciones para aproximarse a la estabilidad del producto y una correcta interpretación de la gráfica de contorno (Yolmeh y Jafari, 2017; Candiotti et al., 2018; Ferreira et al., 2019). Para ello se necesita que el trozo de tubo de la anchoveta tenga la mayor ganancia de sal y la mayor pérdida de agua evitando mermas en su producto. Se encontró que entre 200-250 min, 5-7°C, 14-16% de concentración de sal en la solución y una relación de solución-producto de 3,0-3,5 se satisficían las restricciones de optimización al encontrar un área de intersección entre las curvas que representen la mayor ganancia de sal y la mayor pérdida de agua. Con estos valores se obtienen los siguientes valores para las variables dependientes: 5,84-6,46%NaCl y 68,76-67,52%H presente en el trozo de tubo de anchoveta después del proceso de deshidratación osmótica, con un grado de correlación de 0,936 y 0,904, respectivamente.

Tabla 4 Coeficientes de difusión (De) según los modelos de Crank y Azuara

Modelos	Difusividad	Ecuación
Crank	$D_{ef} = 2,811591 \times 10^{-10} m^2 / s$	$D_e = \frac{(Y - 0,382) \times 1,73329 \times 10^{-5}}{2t}$
Azuara	$\bar{D}_{ef,ss} = 2,63153 \times 10^{-10} m^2 / s$	$D_{ef,ss} = \frac{6,96732 \times 10^{-13} \times \pi t}{(2 + 0,000729 t)^2}$
	$\bar{D}_{ef,w} = 4,34558 \times 10^{-10} m^2 / s$	$D_{ef,w} = \frac{6,96732 \times 10^{-13} \times \pi t}{(2 + 0,000729 t)^2}$
Azuara modificado	$\bar{D}_{ef,ss} = 3.64542 \times 10^{-10}$	$D_{e,ss} = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{s_2 l}{1 + s_2 t} \right) \left(\frac{\Delta M_{\infty}^{ss,mod}}{\Delta M_{\infty}^{ss,exp}} \right) \right]^2$
	$\bar{D}_{ef,w} = 4.47011 \times 10^{-10}$	$D_{e,w} = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{s_1 l}{1 + s_1 t} \right) \left(\frac{\Delta M_{\infty}^{w,mod}}{\Delta M_{\infty}^{w,exp}} \right) \right]^2$

Luego de haber obtenido el rango de las condiciones óptimas se procedió a realizar experimentalmente el proceso de deshidratación osmótica puntualmente (a 5 °C, 225 min, 15% de NaCl y relación 3,25), de la cual se obtuvo un porcentaje de ganancia de sal de 5,93% mientras que el programa predice que el contenido de sal a dichas condiciones debe de ser 6,17% y para el contenido de la humedad final experimentalmente se obtuvo un 68,28% y el modelo predice un 68,17% con ERM de 4,05 y 0.16% respectivamente. Tal como se puede comparar tanto en la ganancia NaCl como en el contenido de humedad final de la anchoveta deshidratada son muy bien predichos por el modelo polinómico estadístico.

3.6. Difusividad efectiva

Al observar el resultado de Def que se calcula a partir del modelo de Crank se nota que es muy similar a la difusividad que el modelo de Azuara presenta para la ganancia de NaCl; pero difieren con la difusividad del agua. Cheng et al., (2014), determinó la Def de NaCl de $9,46 \times 10^{-10}$ m²/s, en condiciones óptimas, del proceso de deshidratación osmótica de filete de bonito para tiempos de pulso de vacío de 150 mbar de 10 minutos, razón de circulación de salmuera de 2,5 m³/h, altura de solución osmótica sobre la bandeja de 4cm, temperatura de solución osmótica de 5 °C y tiempo de procesamiento de 60 minutos, y un valor de difusividad de NaCl $8,55 \times 10^{-10}$ m²/s obtenida en la misma condición sin aplicación de vacío, las cuales son superiores obtenidas en este trabajo. La Def podría deberse a que trabajó su experimento utilizando vacío y más por la aplicación forzada de la salmuera. El aplicar recirculación de la salmuera hace que el proceso de DO tenga una fuerza impulsora adicional, lo que reduce el tiempo de transferencia de masa.

De esto se puede decir, como lo indica Van Nieuwnhuijzen et al. (2001); Ochoa-Martínez y Ayala-Aponte (2004); Assis et al. (2016) que no ha sido posible comparar los valores de Def reportados en la literatura debido a los diferentes métodos de estimación, a los modelos utilizados y a la Def de condiciones sobre las que se ha sometido la experimentación.

Algunos autores, además de las condiciones de temperatura, vacío y otras, explican que la Def se debe también a otros factores. Según Sarang y Sastry (2007); Pezo et al. (2013); Savadkoobi y Kasapis (2016), la matriz cárnica se considera como una estructura insoluble y una fase acuosa a través de la cual se difunde un soluto, pero parte

de las proteínas son solubilizadas además el agua penetra a la matriz, disminuyendo de esta manera el coeficiente de Def de la matriz. Otra característica es si el pescado está fresco o congelado, donde la difusión de la sal será menor, recalando que por su frescura aun contiene ATP, este podría ser utilizado para las bombas de iones que mantendrán gradientes de concentraciones a través de la membrana que incrementen la resistencia (Yadav y Singh, 2014; Gómez-Salazar et al., 2015; Alabi et al., 2020).

Es importante concentraciones de NaCl producirá en la hidratación del tejido cárnico y modificando su capacidad de retención de agua, donde el ión cloruro se enlaza al miofilamento causando la predominancia de carga negativa que incrementa la repulsión, esta repulsión genera en la carne incremento en la hidratación; a altas concentraciones las miofibrillas se encogen y la capacidad de retención de agua disminuye (Hansen et al., 2008; Filipović et al., 2012; Zhang et al., 2020; Zhu et al., 2020). Por lo cual el coeficiente de Def se afecta durante el proceso de DO siendo elevado durante los primeros minutos seguido de una disminución al transcurrir el proceso.

4. Conclusiones

Se obtuvo un modelo matemático polinómico de buen ajuste (95% de confianza) para la ganancia de cloruro de sodio y el contenido de humedad final (R² de 0,936 y 0,904, respectivamente). El modelo matemático que menos se ajustó a los datos experimentales fue el modelo matemático de Crank (R² de 0,635) tanto para la ganancia de cloruro de sodio como para la pérdida de agua. Los valores de la Difusividad Efectiva para el proceso de deshidratación osmótica de trozos de tubo de anchoveta fueron de $2,63153 \times 10^{-10}$ m²/s para el cloruro de sodio y de $4,34558 \times 10^{-10}$ m²/s para la difusividad del agua, utilizando el modelo predictivo de Azuara.

Los parámetros para la optimización del proceso de deshidratación osmótica del trozo de tubo de anchoveta fueron: temperatura de 5 a 7 °C, concentración de la solución de 14 a 16%NaCl, relación solución-producto de 3 a 3,5 y un tiempo de 200 a 250 min, lo que permite obtener una concentración de 5,94 a 6,46%NaCl y 68,76 a 67,52%H dentro de los trozos de tubo de anchoveta. El mayor cambio de NaCl y agua de la solución al trozo de anchoveta se da en los primeros 75 minutos de iniciada el proceso de deshidratación osmótica.

El modelo modificado de Azuara propuesto ajusta mucho mejor la ganancia de NaCl (R^2 : 94,2%) y la pérdida de agua (R^2 : 72,4%); sin embargo, se sugiere realizar más investigaciones con otras especies utilizando el modelo modificado de Azuara para modificarlo.

ORCID

R. Siche  <https://orcid.org/0000-0003-3500-4928>

R. Jara  <https://orcid.org/0000-0003-0063-142X>

J. Salazar-Campos  <https://orcid.org/0000-0001-6906-1336>

Referencias bibliográficas

- Alabi, K.; Zhu, Z.; Sun, D. 2020. Transport phenomena and their effect on microstructure of frozen fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 101: 63-72.
- Assis, R.; Morais, M.; Morais, M. 2016. Mass transfer in osmotic dehydration of food products: comparison between mathematical models. *Food Engineering Reviews* 8(2): 116-133.
- AOAC. 2005. Official Methods 925.09: Moisture in cassava – Air Oven Methods: Official Methods of Analysis of AOAC International.
- AOAC. 2005. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Sodium chlorides in canned vegetables. AOAC 971.27.
- AOAC. 1995. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 16.ed. Arlington. v.1.
- Azuara, E.; Beristian, C.; García, S. 1992. Development of a mathematical model to predict Kinetics of osmotic dehydration. *International Journal of Food Science and Technology* 29(4): 239-242.
- Azoubel, M. 1999. Estudio de la Cinética de Deshidratación por Inmersión y Secado de Tomate (*Lycopersicon esculentum*). 101f. Tesis. Universidad Estatal de Campinas. Campinas. Brasil.
- Candiotti, L.; De Zan, M.; Cámara, M.; Goicoechea, H. 2014. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. *Talanta* 124: 123-138.
- Cheng, F.; Zhang, M.; Adhikari, B.; Islam, N. 2014. Effect of power ultrasound and pulsed vacuum treatments on the dehydration kinetics, distribution, and status of water in osmotically dehydrated strawberry: a combined NMR and DSC study. *Food and bioprocess technology* 7(10): 2782-2792.
- Cichowska, J.; Figiel, A.; Stasiak-Rózańska, L.; Witrowa-Rajchert, D. 2019. Modeling of osmotic dehydration of apples in sugar alcohols and dihydroxyacetone (DHA) solutions. *Foods* 8(1): 20.
- Corrêa, J.; Ernesto, D.; de Mendonça, K. 2016. Pulsed vacuum osmotic dehydration of tomatoes: Sodium incorporation reduction and kinetics modeling. *LWT-Food Science and Technology* 71: 17-24.
- Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press. Oxford science publications. 414 pp.
- Dermesonlouglou, E.; Pantelaiaki, K.; Andreou, V.; Katsaros, G.; Taoukis, P. 2019. Osmotic pretreatment for the production of novel dehydrated tomatoes and cucumbers. *Journal of Food Processing and Preservation* 43(7): e13968.
- Estévez-Sánchez, H.; González-Pérez, E.; Ochoa-Velasco, E.; García-Alvarado, A.; Cruz-González, D.; Sampieri, A.; Ruiz-López, I. 2019. Registro de conjunto de puntos para un desajuste geométrico reducido durante la estimación de las propiedades de transferencia de masa en la deshidratación osmótica de alimentos de forma compleja. *Tecnología de secado*. 1-12.
- Ferreira, S.; Junior, M.; Felix, C.; da Silva, D.; Santos, A.; Neto, J.; Souza, A. S. 2019. Multivariate optimization techniques in food analysis – A review. *Food chemistry* 273: 3-8.
- Filipović, S.; Čurčić, L.; Nićetin, R.; Plavšić, V.; Koprivica, B.; Mišljenović, M. 2012. Mass transfer and microbiological profile of pork meat dehydrated in two different osmotic solutions. *Hemjska industrija* 66(5): 743-748.
- Genina-Soto, P.; Barrera-Cortes, J.; Gutierrez-Lopez, G.; Nieto, E. A. 2001. Temperature and concentration effects of osmotic media on OD profiles of sweet potato cubes. *Drying Techn.* 19(3-4): 547-558.
- Gómez-Salazar, A.; Clemente-Polo, G.; Sanjuán-Pelliccer, N. 2015. Revisión de modelos matemáticos para describir el proceso de salazón de alimentos. *Dyna* 82 (190): 23-30.
- Hansen, C.; Berg, F.; Ringgaard, S.; Stokkilde-Jorgensen, H. 2008. Diffusion of NaCl in meat studied by ¹H and ²³Na magnetic resonance imaging. *Meat Science* 80(3): 851-856.
- ITP-Instituto Tecnológico Pesquero del Perú. 2000. Determinación de proteína cruda. METODO LABS-ITP-FQ-001-98, Rev. 01.
- ITP-Instituto Tecnológico Pesquero del Perú. 2000. Determinación de grasa cruda. METODO LABS-ITP-FQ-003-98, Rev. 02.
- Khan, R. 2012. Osmotic dehydration technique for fruits preservation-A review. *Pakistan Journal of Food Sciences* 22(2): 71-85.
- Li, D.; Zhu, Z.; Sun, D. 2018. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. *Trends in Food Science & Technology* 75: 46-55.
- Maran, P.; Sivakumar, V.; Thirugnanasambandham, K.; Sridhar, R. 2013. Artificial neural network and response surface methodology modeling in mass transfer parameters predictions during osmotic dehydration of *Carica papaya* L. *Alexandria Engineering Journal* 52(3): 507-516.
- Ochoa-Martínez, I.; Ayala-Aponte, A. 2005. Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica mathematical models of mass transfer in osmotic dehydration modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *CYTA-Journal of Food* 4(5): 330-342.
- Panagiotou, N.; Karathanos, V.; Maroulis, Z. 1998. Mass transfer modeling of the osmotic dehydration of some fruit. *International journal of food science and technology* 33: 267-284.
- Pezo, L.; Čurčić, L.; Filipović, S.; Nićetin, R.; Koprivica, B.; Mišljenović, M.; Lević, B. 2013. Artificial neural network model of pork meat cubes osmotic dehydration. *Hemjska industrija*. 67(3): 465-475.
- Pigott, M.; Tucker, W. 1996. *Seafood effects of technology on nutrition*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Rahman, M.; Joardder, U.; Khan, H.; Pham, D.; Karim, A. 2018. Multi-scale model of food drying: Current status and challenges. *Critical reviews in food science and nutrition* 58(5): 858-876.
- Reyes, G.; Corzo, O.; Bracho, N. 2005. Optimización de la deshidratación osmótica de sardina mediante la metodología de superficies de respuesta. *Revista científica* 15(4): 377-384.
- Saputra, D. 2006. Osmotic dehydration of pineapple. *Drying technology* 19(2): 415-425.
- Sarang, S.; Sastry, S. 2007. Diffusion and equilibrium distribution coefficients of salt within vegetable tissue: Effects of salt concentration and temperature. *Journal of Food Engineering* 82(3): 377-382.
- Savadkoochi, S.; Kasapis, S. 2016. High pressure effects on the structural functionality of condensed globular-protein matrices. *International journal of biological macromolecules* 88: 433-442.
- Taşeri, L.; Aktaş, M.; Şevik, S.; Gülcü, M.; Seckin, G.; Atekel, B. 2018. Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food chemistry* 260: 152-159.
- Torreggiani, D. 1995. *Technological aspects of osmotic dehydration of food preservation by moisture*. Fundamentals and application. Lancaster, PA, EEUU. 281-304.
- Van Nieuwenhuijzen, H.; Zareifard, R.; Ramaswamy, S. 2001. Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes. *Drying Technology* 19(3-4): 525-545.
- Vicente, S.; Nieto, B.; Hodara, K.; Castro, A.; Alzamora, M. 2012. Changes in structure, rheology, and water mobility of apple tissue induced by osmotic dehydration with glucose or trehalose. *Food and Bioprocess Technology* 5(8): 3075-3089.
- Yadav, K.; Singh, V. 2014. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology* 51(9): 1654-1673.
- Yolme, M.; Jafari, M. 2017. Applications of response surface methodology in the food industry processes. *Food and Bioprocess Technology* 10(3): 413-433.
- Zhang, M.; Chen, H.; Mujumdar, S.; Tang, J.; Miao, S.; Wang, Y. 2017. Recent developments in high quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical reviews in food science and nutrition* 57(6): 1239-1255.
- Zhang, D.; Li, H.; Wang, Z.; Emara, A.; He, Z. 2020. Effects of NaCl substitutes on physicochemical properties of salted pork. *Meat Science* 169: 108205.
- Zhao, S.; Zou, L.; Tang, Y.; Mulcahy, D. 2012. Recent developments in forward osmosis: opportunities and challenges. *Journal of membrane science* 396: 1-21.
- Zhu, Z.; Luo, W.; Sun, D. 2020. Effects of liquid nitrogen quick freezing on polyphenol oxidase and peroxide activities, cell water states and epidermal microstructure of wolffberry. *LWT* 120: 108923.