



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FRUTICULTURA

CHAYOTE OSMODESHIDRATADO Y ENRIQUECIDO CON OLEORRESINA DE PIMIENTA NEGRA

KARINA HUERTA VERA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: "Chayote osmodeshidratado y enriquecido con oleorresina de pimienta negra", realizada por la alumna: Karina Huerta Vera, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FRUTICULTURA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



DRA. MA. DE LOURDES ARÉVALO GALARZA

**DIRECTORA DE
TESIS**



DRA. ADRIANA CONTRERAS OLIVA

ASESOR



DR. ENRIQUE FLORES ANDRADE

ASESOR



DR. SERGIO HUMBERTO CHÁVEZ FRANCO

ASESOR



DR. ÁNGEL VILLEGAS MONTER

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2021

CHAYOTE OSMODESHIDRATADO Y ENRIQUECIDO CON OLEORRESINA DE PIMIENTA NEGRA

Karina Huerta Vera, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz) es originario de América Central. Se comercializa fresco; sin embargo, su vida de anaquel es limitada porque el embrión germina dentro del fruto, lo que acelera su deterioro y reduce calidad y valor comercial. Mediante deshidratación osmótica (DO) se obtiene chayote parcialmente deshidratado, mínimamente procesado y permite enriquecerlo con compuestos bioactivos. Dado lo anterior, el objetivo de este estudio fue desarrollar un producto de chayote mínimamente procesado con contenido de humedad intermedio, actividad de agua reducida mediante DO y enriquecido con oleorresina de pimienta negra. La hipótesis es que las propiedades funcionales, estructurales y nutricionales de chayote pueden ser modificadas mediante la incorporación de ingredientes funcionales en su tejido celular a través de DO. Las cinéticas de transferencia de masa del chayote osmodeshidratado en soluciones de sacarosa, se afectaron por la concentración de sacarosa, la temperatura y el tiempo de procesamiento. Las cinéticas de transferencia de masa del chayote osmodeshidratado en solución osmótica con emulsiones se afectaron por el biopolímero emulsificante, la cantidad de etanol, el tiempo de inmersión y la temperatura de la DO. Lo anterior modificó, entre otras propiedades del chayote: el contenido de humedad, la actividad de agua, los sólidos solubles y el color. La estructura compleja de los tejidos de chayote durante la osmodeshidratación atraviesa por tres etapas, en el nivel celular, dependientes del contenido de agua. Los coeficientes de agua indican que el proceso de difusión fue regulado entrópicamente por la estructura de las células vegetales y cambios microestructurales. La estabilidad de las emulsiones permitió la transferencia de agua y sólidos durante el proceso osmótico y permitió la incorporación de oleorresina de pimienta negra al tejido celular del chayote. Mediante osmodeshidratación es posible obtener alimentos mínimamente procesados impregnados con compuestos bioactivos que modifiquen sus propiedades funcionales, estructurales y nutricionales.

Palabras clave: Deshidratación osmótica, compuestos bioactivos, piperina, biopolímeros, emulsiones con etanol.

OSMODESHYDRATED CHAYOTE AND ENRICHED WITH BLACK PEPPER OLEORESIN

Karina Huerta Vera, Ph D.
Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

The chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz) is native to Central America. It is sold fresh; however, its shelf life is limited because the embryo germinates within the fruit, which accelerates its deterioration and reduces quality and commercial value. By means of osmotic dehydration (DO), partially dehydrated chayote is obtained, minimally processed and it can be enriched with bioactive compounds. Given the above, the mean of this study was to develop a minimally processed chayote product with intermediate moisture content, reduced water activity by DO and enriched with black pepper oleoresin. The hypothesis is that the functional, structural and nutritional properties of chayote can be modified by incorporating functional ingredients into its cellular tissue through DO. The mass transfer kinetics of the osmodehydrated chayote in sucrose solutions were affected by the sucrose concentration, the temperature and the processing time. The mass transfer kinetics of chayote osmodehydrated in osmotic solution with emulsions were affected by the emulsifying biopolymer, the amount of ethanol, the immersion time and the OD temperature. The foregoing modified, among other properties of the chayote: the moisture content, the water activity, the soluble solids and the color. The complex structure of chayote tissues during osmodehydration goes through three stages, at the cellular level, dependent on the water content. The water coefficients indicate that the diffusion process was entropically regulated by the structure of plant cells and microstructural changes. The stability of the emulsions allowed the transfer of water and solids during the osmotic process and allowed the incorporation of black pepper oleoresin to the cell tissue of the chayote. Through osmodehydration it is possible to obtain minimally processed foods impregnated with bioactive compounds that modify their functional, structural and nutritional properties.

Keywords: Osmotic dehydration, bioactive compounds, piperine, biopolymers, emulsions with ethanol.

AGRADECIMIENTOS

A la **Dra. Ma. de Lourdes Arévalo Galarza** por participar como consejera, aportar orientación continua, supervisión y apoyo incondicional a mi investigación. También agradezco de manera muy sincera su comprensión y su excelente calidad humana.

A la **Dra. Adriana Contreras Oliva** por motivarme continuamente a avanzar con mi investigación, por sus consejos y su gran calidad humana.

Al **Dr. Enrique Flores Andrade** por la visión crítica y científica aportada en cada fase del proyecto, por contagiarme de su creatividad y curiosidad científica, y por compartir conmigo su experiencia y conocimiento.

Al **Dr. Sergio Humberto Chávez Franco** por sus aportes a mi formación académica y su excelente calidad profesional y humana.

Al **Dr. Ángel Villegas Monter** por sus valiosas aportaciones a mi investigación y su excelente calidad profesional y humana.

A la **Dra. Cecilia Beatriz Peña Valdivia** por participar como sinodal, su interés en la revisión del documento final y sus valiosas y acertadas aportaciones. Así como sus aportes a mi formación académica y su excelente calidad profesional y humana.

Al **Colegio de Postgraduados** por permitirme formar parte de esta comunidad, brindarme las instalaciones adecuadas y un excelente personal académico necesario para mi formación profesional y el desarrollo de mi proyecto de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para continuar con mi formación académica.

DEDICATORIA

A mi hermosa princesa Karime.

A mi bebé consentido Emiliano.

A mi madre Magdalena Vera Carrera por darme esperanza, apoyar mis sueños, acompañarme en mi camino y brindarme su mano firme y amigable para alcanzar mis metas; Dios te bendiga y me conceda la dicha de tenerte a mi lado durante mucho tiempo.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
HIPOTESIS	3
OBJETIVOS	3
Objetivo general	3
Objetivos particulares	3
CAPÍTULO 1	4
INCORPORACIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS EN PRODUCTOS HORTOFRUTÍCOLAS MEDIANTE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA: UNA REVISIÓN	4
1.1. RESUMEN	4
1.2. INTRODUCCIÓN	5
1.3. METODOLOGÍA	6
1.4. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA	6
1.5. DISCUSIÓN	7
1.5.1. Deshidratación osmótica	7
1.5.2. Respuesta celular al proceso osmótico	10
1.5.3. Alimentos funcionales desarrollados por DO	13
1.5.4. Estabilidad fisicoquímica de alimentos osmodeshidratados	16
1.5.5. Perspectivas	18
1.6. CONCLUSIONES	19
1.7. LITERATURA CITADA	20
CAPÍTULO II	26
FACTORES QUE AFECTAN LA CINÉTICA DE TRANSFERENCIA DE MASA DE CHAYOTE (<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sw.) DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE	26
2.1 RESUMEN	26
2.2 INTRODUCCIÓN	26
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS	29

2.3.1. Material vegetal	29
2.3.2. Preparación de muestras y proceso osmótico	29
2.3.3. Modelos matemáticos.....	30
2.3.4. Cuantificación de a_w y sólidos solubles totales (SST).....	32
2.3.5. Diseño experimental.....	32
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
2.4.1. Cinéticas de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica	33
2.4.2. Difusividad efectiva.....	39
2.4.3. Actividad de agua	44
2.4.4. Sólidos solubles totales.....	45
2.4.5. Color.....	49
2.4.6. Cambios de volumen durante la deshidratación osmótica	51
2.5. CONCLUSIONES	54
2.6. LITERATURA CITADA	54
CAPÍTULO III.....	63
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA EN RODAJAS DE CHAYOTE (<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sw.) CON IMPREGNACIÓN DE OLEORRESINA DE PIMIENTA NEGRA	63
3.1. RESUMEN.....	63
3.2 INTRODUCCIÓN	63
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	66
3.3.1. Material Vegetal.....	66
3.3.2. Preparación de soluciones osmóticas	67
3.3.3. Tamaño medio de gota y potencial zeta	67
3.3.4. Procedimiento de deshidratación-impregnación	68
3.3.5. Análisis de rodajas de chayote osmodeshidratado.....	70
3.3.6. Análisis estadístico	71
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
3.4.1. Tamaño de partícula, índice de polidispersidad y potencial zeta de emulsiones	71
3.4.2. Cinéticas de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica	77
3.4.3. Actividad de agua	81
3.4.4. Difusividad efectiva.....	83
3.4.5. Impregnación de piperina	84
3.4.6. Color.....	87

3.5. CONCLUSIONES	88
3.6. LITERATURA CITADA	89
CONCLUSIONES GENERALES	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Cuadro 1-1. Matrices vegetales enriquecidas con ingredientes funcionales mediante impregnación al vacío o deshidratación osmótica asistida con pulsos de vacío.....	16
Cuadro 2-1. Parámetros cinéticos del modelo de Azuara para pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico.	35
Cuadro 2-2. Energía de activación requerida para la difusión de agua y sólidos durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa.	47
Cuadro 2-3. Parámetros estimados del modelo DR-Hill para la actividad de agua (a_w) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico.....	49
Cuadro 2-4. Parámetros estimados del modelo Rational Model para el contenido de sólidos solubles totales ($^{\circ}Bx$) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico.	51
Cuadro 3-1. Tamaño, Índice de polidispersión (PDI) y Potencial Zeta de la solución osmótica con emulsión recién elaborada en función de la concentración de etanol y temperatura.	78
Cuadro 3-2. Parámetros obtenidos con el método continuo para la deshidratación osmótica de rodajas de chayote utilizando solución osmótica con emulsiones de concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábiga (GA), como emulsionantes.	90
Figura 1-1. Transferencia de masa entre el tejido vegetal y la solución hipertónica durante la deshidratación osmótica. Las flechas azules representan la transferencia de agua del producto hacia la solución hipertónica y las flechas rojas indican la migración de soluto osmótico hacia el interior del producto.	7
Figura 1-2. Cambios en el volumen (V_t/V_o) y contenido de humedad (X_t/X_o) de rodajas de fruto de chayote <i>virens levis</i> durante deshidratación osmótica en solución de sacarosa (50 % a 35 °C). Cambios a nivel celular durante las diferentes etapas del proceso osmótico: a) Células vegetales frescas al inicio del proceso. b) Células en la Etapa 1. c) Células en la Etapa 2. d) Células en la Etapa 3.	11
Figura 1-2. Cambios en la apariencia de diferentes productos hortofrutícolas a diferentes tiempos de osmodeshidratación con solución de sacarosa (50 % a 35 °C).	13

Figura 1-4. Micrografías SEM de la estructura de rodajas de banano Tabasco (<i>Musa paradisiaca</i>) sin tratamiento osmótico; B) Rodajas con tratamiento osmótico a presión atmosférica con solución de sacarosa (50 %, 35 min a 35 °C) y C) Rodajas con tratamiento osmótico con 10 min de pulso de vacío con solución de sacarosa (50 %, 35 min a 35 °C).....	15
Figura 2-1. Cinéticas de pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de chayote en soluciones de sacarosa. DO, presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. a Proceso a 25 °C, b proceso a 35 °C y c proceso a 45 °C.	38
Figura 2-2. Cinéticas de ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de chayote en soluciones de sacarosa. DO, presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. a Proceso a 25 °C, b proceso a 35 °C y c proceso a 45 °C.	40
Figura 2-3. Efecto de la temperatura sobre D_w durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa. DO, presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. a Solución de sacarosa a 40 °Bx, b solución de sacarosa a 50 °Bx y c solución de sacarosa a 60 °Bx. Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).	43
Figura 2-4. Efecto de la temperatura sobre D_s durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa. DO, presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. a Solución de sacarosa a 40 °Bx, b solución de sacarosa a 50 °Bx y c solución de sacarosa a 60 °Bx. Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).	44
Figura 2-5. Cambios en el color de rodajas de chayote durante la deshidratación osmótica presión atmosférica con solución de sacarosa a 50 °Bx a 35°C. a chayote fresco, b chayote osmodeshidratado por 300 min.	53
Figura 2-5. Propiedades de color de chayote fresco y osmodeshidratado por 300 min a presión atmosférica (DO) y con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min (DOPV). Valores promedio \pm desviación estándar (n=3). Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).	55
Figura 2-7. Cambios en el volumen y contenido de humedad de rodajas de chayote durante la deshidratación osmótica. DO, presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. a Solución de sacarosa a 40 °Bx DO, b solución de sacarosa	

a 50 °Bx DO, c solución de sacarosa a 60 °Bx DO, d solución de sacarosa a 40 °Bx DOPV, e solución de sacarosa a 50 °Bx DOPV, y f solución de sacarosa a 60 °Bx DOPV.....	57, 58
Figura 3-1. Variación del tamaño de partícula (símbolos) e índice de polidispersidad (líneas continuas) de emulsiones preparadas con goma arábica (GA) y concentrado de suero de leche (WPC) a diferentes concentraciones de etanol a diferentes temperaturas.....	82
Figura 3-2. Potencial zeta de las emulsiones de las emulsiones preparadas con concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA) a diferentes concentraciones de etanol durante su permanencia en la solución osmótica a diferentes temperaturas.....	85
Figura 3-3. Cinética de pérdida de agua y ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote utilizando solución osmótica con emulsiones utilizando concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA), como emulsionantes. (a) WFL para WPC, (b) WFL para GA, (c) SG para WPC, (d) SG para GA	88
Figura 3-4. Actividad del agua (a_w) de rodajas de chayote durante la deshidratación osmótica con solución osmótica con emulsiones usando concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA), como emulsionantes.	92
Figura 3-5. Difusividad efectiva del agua (D_w) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote usando solución osmótica con emulsiones usando concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA), como emulsionantes.....	93
Figura 3-6. Contenido de piperina en tejido de chayote durante el tratamiento osmótico utilizando solución osmótica con emulsiones de concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA), como emulsificantes.....	96
Figura 3-7. Micrografía SEM de la superficie del chayote. (a) Muestra de control sin tratamiento osmótico. (b) Chayote osmodeshidratado a 35 °C en solución de sacarosa con emulsión de WPC durante 420 min. (c) Chayote osmodeshidratado a 35 °C en solución de sacarosa con emulsión GA durante 420 min.	99
Figura 3-8. Cambio total de color (ΔE) en rodajas de chayote osmodeshidratadas utilizando solución osmótica con emulsiones de concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA).....	100

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1-1. Matrices vegetales enriquecidas con ingredientes funcionales mediante impregnación al vacío o deshidratación osmótica asistida con pulsos de vacío.....	16
Cuadro 2-1. Parámetros cinéticos del modelo de Azuara para pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico.	35
Cuadro 2-2. Energía de activación requerida para la difusión de agua y sólidos durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa.	47
Cuadro 2-3. Parámetros estimados del modelo DR-Hill para la actividad de agua (a_w) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico.....	49
Cuadro 2-4. Parámetros estimados del modelo Rational Model para el contenido de sólidos solubles totales ($^{\circ}Bx$) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico.	51
Cuadro 3-1. Tamaño, Índice de polidispersión (PDI) y Potencial Zeta de la solución osmótica con emulsión recién elaborada en función de la concentración de etanol y temperatura.	78
Cuadro 3-2. Parámetros obtenidos con el método continuo para la deshidratación osmótica de rodajas de chayote utilizando solución osmótica con emulsiones de concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábiga (GA), como emulsionantes.	90

INTRODUCCIÓN GENERAL

El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz) pertenece a la familia Cucurbitaceae originaria de América Central. Los chayotes de la variedad *virens levis* tienen sabor suave y neutro, y se suelen consumir crudos en ensaladas, hervidos, fritos o rellenos y horneados (Avendaño Arrazate *et al.*, 2011). La fruta es rica en minerales: potasio, calcio, fósforo y magnesio; también contiene vitaminas C, E y ácido fólico (Vieira *et al.*, 2019). El consumo de la fruta se ha asociado con diferentes beneficios para la salud humana debido a que son fuente de compuestos bioactivos como vitaminas, minerales, fitoesteroles, fibra dietaria y otros. Algunos de estos destacan por su actividad diurética (Loizzo *et al.*, 2016), antioxidante (Díaz-de-Cerio *et al.*, 2019), antibacteriana (Frías Tamayo *et al.*, 2016), antihipertensiva (Shafirany *et al.*, 2016), antiepiléptica (Firdous *et al.*, 2012) y capacidad de inhibir la proliferación de células cancerosas (Aguñiga-Sánchez *et al.*, 2015).

Generalmente, el chayote se comercializa fresco; México es el primer productor y exportador del mundo con cerca de 2661.84 t (SIAP 2016). Sin embargo, la vida de anaquel de este producto es limitada debido que es el embrión tiene germinación prematura dentro del fruto, lo que acelera su deterioro y reduce su calidad y valor comercial (Cadena- Iñiguez *et al.*, 2007). Una alternativa para extender la vida útil del producto es reducir su contenido de agua. En este sentido, la deshidratación osmótica (DO) permite producir chayote parcialmente deshidratado, mínimamente procesado, y su enriquecimiento con ingredientes funcionales. Este método consiste en sumergir los tejidos vegetales en solución hipertónica a una temperatura y durante un tiempo determinado para promover la pérdida de agua (*WL*) de las células, y lograr la ganancia de soluto osmótico (*SG*) en los espacios intercelulares y células externas cortadas del tejido vegetal (Chiralt y Fito, 2001). La DO depende de variables asociadas al proceso, como la composición y la concentración del agente osmótico, la temperatura, el tiempo de inmersión, la presencia o ausencia de agitación en el medio osmótico (Corrêa *et al.*, 2014; Ito *et al.*, 2007; Lombard *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2007) y las características del tejido dependientes de la especie, la variedad, la etapa de maduración, las propiedades fisicoquímicas y la estructura del tejido (Junqueira *et al.*, 2020).

Una de las ventajas de la DO es la impregnación de ingredientes funcionales solubles en agua en la estructura porosa de los tejidos vegetales. Este fue el caso de ciertos compuestos fenólicos en

mango (Batista de Medeiros *et al.*, 2019), lactato de calcio en cambuci (Schincariol Paes *et al.*, 2019), probióticos como *Lactobacillus plantarum* en manzana (Emser *et al.*, 2017) y modificadores de sabor como humo líquido en manzana (Akharume *et al.*, 2018). El uso de sistemas de protección como las emulsiones aceite en agua (O / W) ha permitido encapsular e incorporar ingredientes funcionales insolubles en agua en tejidos vegetales mediante DO. Otros estudios han reportado la impregnación de compuestos lipofílicos en frutas, como curcuminoides en banano (Bellary y Rastogi, 2014) y coco (Bellary *et al.*, 2011), inulina y oleorresina de Chile piquín en mango (Jiménez-Hernández *et al.*, 2017) y oleorresina de jengibre en mango (Shukla *et al.*, 2019).

Además de las ya mencionadas, otra biomolécula liposoluble con potencial aplicación para el enriquecimiento de frutas es la piperina de la oleorresina de pimienta negra. Este es un alcaloide natural pungente con escasa solubilidad en agua que se encuentra en varias especies *Piper* y es comúnmente utilizado como condimento alimentario (Li *et al.*, 2019; Quilaqueo *et al.*, 2019). Entre sus efectos farmacológicos están: antiinflamatorios, analgésicos, antioxidantes, antimicrobianos, y actividades inmunomoduladoras y antitumorales (Hou *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019; Quilaqueo *et al.*, 2019; Sunila y Kuttan, 2004).

Respecto a la osmodeshidratación de chayote, Ruíz-López *et al.* (2010) reportaron la DO como pretratamiento previo al secado convectivo, con lo que lograron tiempos menores de secado y consumo menor de energía. Sin embargo, hasta el momento, no hay informes disponibles que involucren la impregnación de ingredientes funcionales oleosos en la fracción porosa del tejido del chayote.

El objetivo de la presente investigación fue utilizar el proceso de DO para impregnar rodajas de chayote con oleorresina de pimienta negra encapsulada en una emulsión (aceite en agua) y evaluar las cinéticas de ganancia de sólidos y pérdida de agua durante el proceso.

HIPÓTESIS

Las propiedades funcionales, estructurales y nutricionales de chayote pueden ser modificadas mediante la incorporación de ingredientes funcionales en el tejido celular a través de DO.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un producto de chayote mínimamente procesado con contenido intermedio de humedad, actividad reducida de agua y enriquecido con oleorresina de pimienta negra mediante DO.

Objetivos particulares

- i.** Evaluar el efecto de la concentración de la solución osmótica, temperatura, tiempo de procesamiento y aplicación de pulso de vacío sobre la transferencia de masa, difusividad efectiva, actividad del agua, sólidos solubles totales, color y contracción volumétrica de rodajas de chayote inmersas en solución de sacarosa.
- ii.** Evaluar la aplicación de un modelo empírico en la predicción de la actividad de agua y contenido de sólidos solubles totales durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote.
- iii.** Determinar el efecto del biopolímero emulsificante, cantidad de alcohol, tiempo de inmersión y temperatura de la DO en la impregnación de oleorresina de pimienta negra, pérdida de agua, ganancia de sólidos, difusividad aparente del agua, actividad del agua y color durante el proceso osmótico de rodajas de chayote.

CAPÍTULO 1

INCORPORACIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS EN PRODUCTOS HORTOFRUTÍCOLAS MEDIANTE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA: UNA REVISIÓN

1.1. RESUMEN

La deshidratación osmótica (DO) permite impregnar compuestos bioactivos en la fracción porosa de frutas y hortalizas. El objetivo de este estudio fue conocer los factores de la DO, documentos en la literatura, que determinan la impregnación de compuestos bioactivos en matrices vegetales, su estabilidad fisicoquímica durante almacenamiento y las últimas tendencias en productos hortofrutícolas osmodeshidratados que podrían ser considerados alimentos funcionales. La información científica de las bases de datos la presentamos en tres secciones: fundamentos de la DO, productos hortofrutícolas enriquecidos con compuestos bioactivos y estabilidad fisicoquímica de los productos durante almacenamiento. Las publicaciones recopiladas fueron 46 (81 % con antigüedad menor a 5 años). Los estudios de productos hortofrutícolas enriquecidos con compuestos bioactivos se han documentado en 44 % de esos estudiados. El efecto de las variables del proceso sobre el flujo másico representó 38 % del grupo de estudios documentados, mientras la estabilidad fisicoquímica del producto en almacenamiento ha sido lo menos evaluado (18 %). La revisión integra resultados de investigaciones de diversas partes del mundo. La información acerca de la estabilidad fisicoquímica de estos productos ha sido menos estudiada, esto limita el tamaño de la muestra revisada. La impregnación de compuestos bioactivos en productos hortofrutícolas es reciente, por lo cual la revisión bibliográfica de las últimas investigaciones provee un panorama para futuros trabajos en el tema. La incorporación de compuestos bioactivos en matrices vegetales está regulada entrópicamente por las membranas celulares. Así, se han enriquecido frutas y hortalizas con vitaminas, minerales, antioxidantes, probióticos, entre otros; pero su estabilidad fisicoquímica durante el almacenamiento se ha evaluado escasamente.

Palabras clave: alimentos funcionales, alimentos deshidratados, compuestos bioactivos, impregnación, estabilidad de alimentos.

1.2.INTRODUCCIÓN

Las frutas y hortalizas son parte esencial de la alimentación de los humanos, ya que son fuente de compuestos bioactivos como vitaminas, minerales, fitoesteroles, fibra dietaria, entre otros. Generalmente, las frutas y hortalizas se comercializan frescas; sin embargo, la vida de anaquel es limitada por su actividad metabólica, susceptibilidad al daño mecánico y por microorganismos, que aceleran su senescencia y muerte (Al-Tayyar, Youssef & Al-Hindi, 2020; Yousuf, Shafiq Qadri, & Srivastava, 2018). Las pérdidas en postcosecha de frutas y hortalizas representan entre 40 y 50 % del total de las pérdidas de alimentos (Ferreira dos Santos et al., 2020; Sawicka, 2019). Las pérdidas se pueden disminuir mediante la deshidratación, que es una de las técnicas de conservación más comunes, ya que reduce la actividad de agua (a_w) por debajo de 0.70. Los métodos de deshidratación incluyen secado al sol, con aire caliente, al vacío y por congelación (Qiu, Zhang, Tang, Ahikari, & Cao, 2019).

En los últimos años estos tratamientos han sido complementados con deshidratación osmótica (DO), pretratamiento y proceso en el cual los tejidos vegetales se sumergen en solución hipertónica a temperatura y durante un tiempo determinado. Así, se alteran de manera controlada las características microestructurales de la matriz vegetal, y puede impregnarse con compuestos bioactivos (minerales, vitaminas, antioxidantes, probióticos, fibras, u otros) en su fracción porosa. Esto beneficia adicionalmente al consumidor. La DO reduce los efectos adversos del calor de procesos subsecuentes, mejora el color, textura y sabor del producto, y minimiza los costos de producción al maximizar la eficiencia energética (Ahmed, Mabood Qazi, & Jamal, 2016).

En papa (*Solanum tuberosum* var. Diacol Capiro) la impregnación de calcio y vitaminas C y E se ha reportado (Duarte-Correa, Díaz-Osorio, Osorio-Arias, Sobral, & Vega-Castro, 2020) y en manzana (*Malus domestica* L. cv. Granny Smith) se documentó la adición de antioxidantes de jugo de betabel (Aguirre-García et al., 2020), probióticos como *Lactobacillus plantarum* en manzana var. Royal Gala (Emser et al., 2017) y *Lactobacillus rhamnosus* en banano (*Musa acuminata*) (Huerta-Vera et al., 2017), entre otros. Esta revisión incluye el análisis de los factores de la DO que determinan la incorporación de compuestos bioactivos en matrices vegetales, y las tendencias recientes en productos hortofrutícolas osmodeshidratados, que podrían calificarse como alimentos funcionales, y su estabilidad fisicoquímica durante almacenamiento.

1.3.METODOLOGÍA

La revisión se centró en la literatura relacionada con la DO como una alternativa para la incorporación de ingredientes funcionales en productos hortofrutícolas. Las bases de datos Web of Science, Elsevier (Science Direct), Springer (SpringerLink), SciELO y Google Scholar. La revisión abarcó el periodo entre 2004 y 2020. Las palabras clave en los filtros de búsqueda fueron: deshidratación osmótica, modificación de la estructura celular, alimentos funcionales, impregnación de compuestos bioactivos y estabilidad de alimentos osmodeshidratados. Los resultados de la revisión se organizaron en tres partes: la primera describe los fundamentos de la DO y discute las variables que determinan el flujo de masa; la segunda describe las tendencias recientes en el desarrollo de productos hortofrutícolas osmodeshidratados que podrían ser considerados alimentos funcionales; y la última describe la estabilidad fisicoquímica de estos productos durante almacenamiento.

1.4.ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA

Resulta interesante que en los últimos años la DO se ha empleado para enriquecer matrices vegetales con ingredientes funcionales. La evidencia científica indica que la impregnación de compuestos bioactivos mediante DO está regulada de forma entrópica por la membrana semipermeable de las células vegetales e influenciada por la temperatura y composición de la solución hipertónica, así como por el contacto entre fases (38 % de las publicaciones). La evidencia (44 % del total) también señala que la DO modifica las propiedades ópticas, mecánicas, sensoriales y funcionales de productos hortofrutícolas. Además, se ha probado que los productos hortofrutícolas enriquecidos con antioxidantes, probióticos y aditivos de sabor son fisicoquímicamente estables durante el almacenamiento (18 % del total). Así, estos productos podrían incursionar como alimentos funcionales, una categoría altamente demandada por el interés de los consumidores en su salud y bienestar. No obstante, la falta de información sobre los procesos de la dinámica de absorción y metabolización del ingrediente activo, limitan el conocimiento sobre su impacto en la salud. Por lo tanto, el desarrollo de productos hortofrutícolas funcionales requiere la intervención de diversas disciplinas con el fin de implementar técnicas adecuadas que garanticen las propiedades benéficas de estos productos y dar certeza al consumidor de adquirir productos confiables.

1.5.DISCUSIÓN

1.5.1. Deshidratación osmótica

La DO es una técnica que involucra la inmersión de matrices alimentarias en solución hipertónica que induce tres flujos, i) transferencia de agua del producto hacia la solución hipertónica, ii) migración de soluto osmótico hacia el interior del producto y, iii) lixiviación de componentes celulares del producto (azúcares, ácidos, minerales, vitaminas) a la solución hipertónica (Figura 1-1) (Ahmed et al., 2016; González-Pérez et al., 2019). Los factores que determinan las propiedades globales del transporte de masa durante el proceso osmótico se describen a continuación:

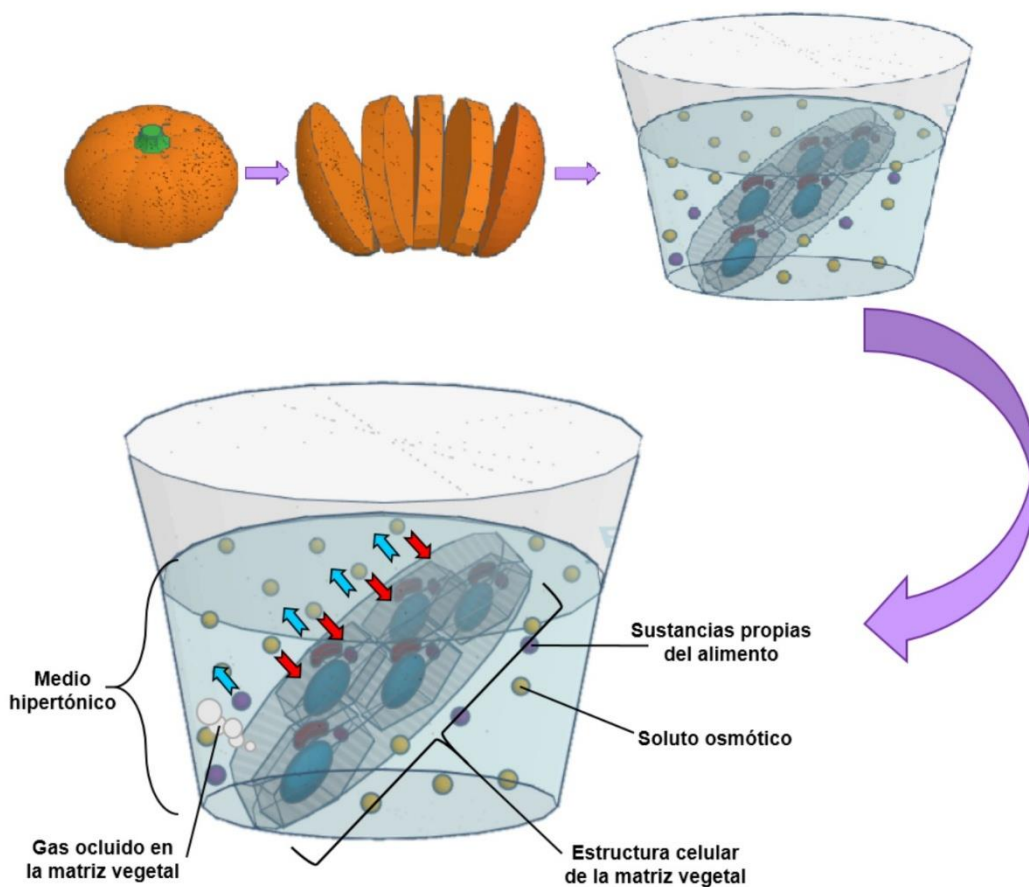


Figura 1-1. Transferencia de masa entre el tejido vegetal y la solución hipertónica durante la deshidratación osmótica. Las flechas azules representan la transferencia de agua del producto hacia la solución hipertónica y las flechas rojas indican la migración de soluto osmótico hacia el interior del producto.

Temperatura: el incremento de la temperatura durante la DO promueve la transferencia de masa al disminuir la viscosidad del medio osmótico y aumentar la permeabilidad de membranas. Cuando la temperatura del proceso excede la sensibilidad del producto se presenta ablandamiento excesivo, oscurecimiento enzimático y pérdida de sabor y aroma (Arias, Perea, & Zapata, 2017; Xiao et al., 2018).

Solución hipertónica: esta se compone de solutos de alto peso molecular (sacarosa) en alta concentración, lo cual optimiza la pérdida de agua (*WL*) del producto al inicio del proceso. Cuando se aplican solutos de peso molecular bajo (glucosa, fructosa, sorbitol, y otros) y concentración baja, se favorece la ganancia de sólidos (*SG*) por encima de la *WL* (Xiao et al., 2018).

Contacto entre fases: la geometría y tamaño del producto afectan la superficie específica (relación superficie/volumen), superficies específicas mayores favorecen la *SG* en el producto y para incrementar *WL* y *SG* es necesaria mayor superficie y menor volumen del producto (González-Pérez et al., 2019). Asimismo, el manejo de relaciones elevadas de solución hipertónica: alimento ($\geq 20:1$) previene la dilución del medio osmótico y la disminución del gradiente de concentración durante el proceso. Además, la agitación durante el proceso asegura el contacto continuo del producto con la solución hipertónica renovada, que favorece la *SG*; sin embargo, los sólidos podrían formar una capa delgada sobre el tejido y actuar como una barrera que dificulte la *WL* del producto (Ahmed et al., 2016).

Características del producto: la especie, variedad y estado de madurez definen la compleja y heterogénea estructura celular de los tejidos vegetales; además, por sus propiedades fisicoquímicas (orientación de fibras, tamaño de espacios intercelulares, interconectividad celular, espacio poroso, sólidos solubles, agua, etc.) diversas pueden facilitar o dificultar el flujo de masa durante el proceso osmótico.

El espacio poroso o porosidad efectiva (ϵ_e), es la fracción de volumen total de la matriz vegetal ocupada por gas. Lech, Michalska, Wojdyło, Nowicka, & Figiel (2018) analizaron el efecto de la ϵ_e en la transferencia de masa durante la DO de especies hortofrutícolas. Los autores mostraron que los productos con ϵ_e elevada, como manzana (var. *Champion*), perejil (*Petroselinum crispum* var. *Eagle*) y rábano negro (*Raphanus sativus* var. *sativus* var. *Kulata Cerna*) presentan valores de 26.75, 22.64 y 20.62 %, respectivamente. Estos valores les permite transferencia mayor de masa

durante el proceso osmótico. Por el contrario, productos como remolacha (*Beta vulgaris* var. *Alto*) y zanahoria (*Daucus carota* var. *Nerac*) con una menor ε_e de 4.16 y 3.45 %, respectivamente, presentaron menor transferencia de masa durante la DO.

La desigualdad de ε_e también se aprecia entre variedades de una misma especie. Esto lo observaron en calabaza (*Cucurbita moschata*), con una ε_e de 4.98, 6.49 y 8.62 % en las variedades *Butternut*, *Muscat de Provence* y *Butternut Orange* respectivamente. Además, cada producto presenta un patrón de maduración específico en función de la expansión celular y actividad enzimática (celulasas, pectinmetilesterasas, poligalacturonasas, entre otras) sobre los polisacáridos de pared celular. Esto modifica la microestructura del tejido vegetal como se refleja en la transformación de espacio apoplástico a simplástico, con incrementos de hasta seis veces entre el inicio y final de maduración. Esto podría afectar las rutas de transporte y la tasa de transferencia de masa durante la DO (Zhang, Zhao, Zhang, Xing, & Jia, 2020).

Sulistyawati, Dekker, Fogliano, & Verkerk (2018) señalaron el efecto del estado de madurez del fruto sobre la ε_e durante la DO en cubos de mango (*Mangifera indica* var. *Kent*) tratados con solución de sacarosa (60 °Bx), pectin metil esterase (PME) y calcio. Ellos reportaron *SG* mayor en mango inmaduro debido a que presenta espacio poroso mayor comparado con el maduro.

La maduración en una estructura vegetal es heterogénea, pues existen distintos dominios o concentrados celulares que contribuyen a la heterogeneidad y anisotropía del tejido. Por ejemplo, Legland, Devaux, Bouchet, Guillon, & Lahaye (2012) observaron que las células del pericarpio de tomate (*Solanum lycopersicum* L. var. *Tradiro*) cercanas al pedicelo son redondas y oscilan entre 250 y 300 μm en las direcciones tangencial y radial; mientras, las células de la región ecuatorial son alargadas y su tamaño varía entre 300 y 350 μm en la dirección tangencial y 300 a 500 μm en la dirección radial.

La ε_e también difiere entre las zonas del fruto de manzana var. *Mutsu*, *Jonagold* y *Kim* (distancia desde el corazón: 6 mm (Zona I); 6-12 mm (Zona II) y 12-18 mm (Zona III)) mostrando valores de ε_e de 0.11, 0.12 y 0.14 % para la zona I; 0.14, 0.15 y 0.17 % para la Zona II, y 0.18, 0.19 y 0.21 % para la Zona III respectivamente (Mavroudis, Dejmek, & Sjöholm, 2004).

1.5.2. Respuesta celular al proceso osmótico

La composición de los productos hortofrutícolas es compleja e incluye cuatro fases: matriz sólida (pared celular, plasmalema, tonoplasto y orgánulos celulares en el citoplasma), fase líquida extracelular, fase líquida intracelular y gaseosa (Fito, LeMaguer, Betoret, & Fito, 2007). Una matriz vegetal contiene hasta 80 % de células parenquimatosas empalmadas e interconectadas, con pared celular (PC) porosa y delgada, citoplasma delimitado por una membrana y una vacuola central grande, que puede ocupar hasta 90 % de la célula madura, en la que se almacenan agua y nutrientes. La PC está compuesta por microfibrillas de celulosa, hemicelulosa y pectina que forman espacios intercelulares; la composición y organización de la PC confieren ciertas propiedades mecánicas a las células individuales, como la rigidez. Particularmente, la pectina presenta funciones específicas como la adhesión célula-célula y la regulación de la porosidad de la PC (Winisdorffer et al., 2015).

Las rutas para el flujo másico a través de tejidos celulares durante la DO son tres, i) el transporte apoplástico, que se lleva a cabo dentro de la continuidad de las paredes celulares, ii) el transporte simplástico entre células adyacentes vía plasmodesmos y, iii) el transporte transmembrana; en el que la difusión de agua, esta mediada específicamente por acuaporinas (proteínas transmembranales especializadas en el transporte de agua) (Castro-Giráldez, Fito, & Fito, 2011; Mauro et al., 2016).

Durante la DO de matrices vegetales, las células parenquimatosas del mesocarpio atraviesan por tres etapas, derivadas de los cambios de volumen (V_t/V_o) y contenido de humedad (X_t/X_o) del producto (Figura 1-2) (Flores-Andrade, Beristain, Vernon-Carter, Gutiérrez, & Azuara, 2009; Seguí, Fito, & Fito, 2012).

En la etapa 1, cuando la matriz vegetal fresca (Figura 1-2a) está sumergida en una solución hipertónica, el gradiente de potencial químico genera la WL del protoplasto, que se contrae y se deforma junto con la PC hasta que las fuerzas de estiramiento dan lugar a la plasmólisis incipiente. Este es el punto crítico en el que la membrana plasmática comienzan a desprenderse de la PC, consecuentemente se da un encogimiento celular (Figura 1-2b).

Durante la etapa 2, el flujo másico a través de la membrana plasmática incrementa las fuerzas impulsoras de estiramiento entre la membrana y la PC, hasta que la membrana se desprende y se contrae elásticamente, generando nuevos espacios intracelulares que serán ocupados por la solución hipertónica, promoviendo así la WL, lo cual resulta en una disminución de humedad y volumen en el producto (Figura 1-2c).

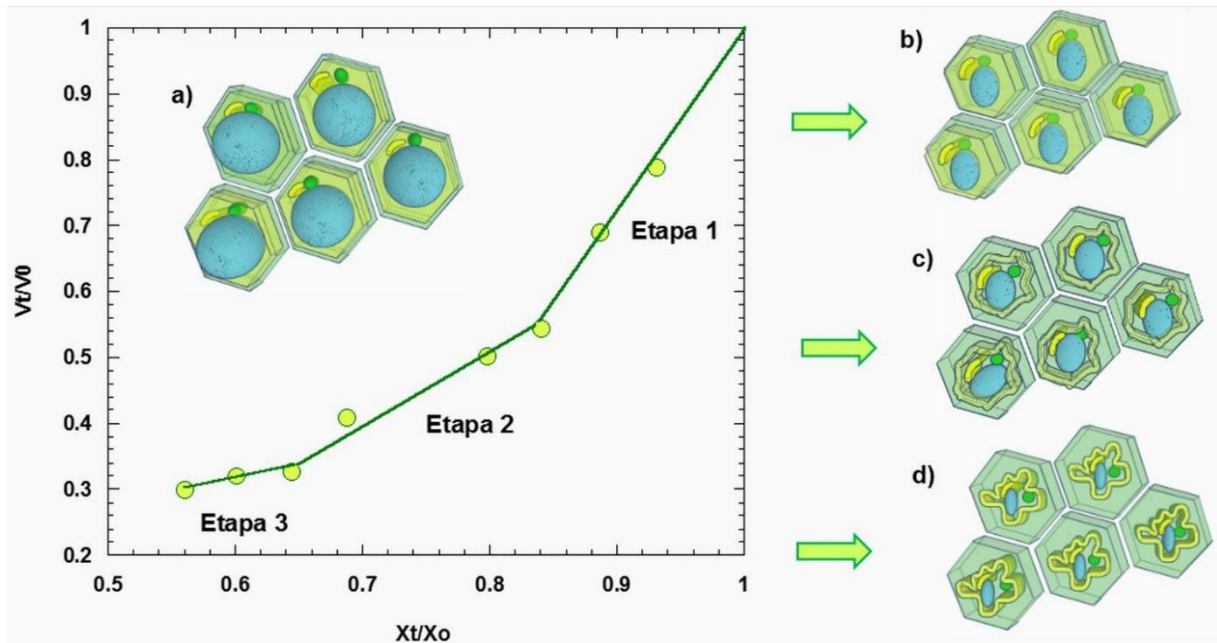


Figura 1-2. Cambios en el volumen (V_t/V_o) y contenido de humedad (X_t/X_o) de rodajas de fruto de chayote *virens levis* durante deshidratación osmótica en solución de sacarosa (50 % a 35 °C). Cambios a nivel celular durante las diferentes etapas del proceso osmótico: a) Células vegetales frescas al inicio del proceso. b) Células en la Etapa 1. c) Células en la Etapa 2. d) Células en la Etapa 3.

En la etapa 3, la estructura celular comienza a colapsar derivado de la separación completa entre la membrana plasmática y la PC, lo que permite que el protoplasto pueda encogerse libremente. No obstante, la PC y las hebras hechtianas (finos hilos citoplasmáticos) continúan actuando como barreras físicas ante el flujo másico. En esta etapa, se presenta una ligera reducción del volumen, sin embargo, la entrada de solución hipertónica a las células provoca que continúe la disminución en el contenido de humedad (Figura 1-2d).

Las modificaciones que ocurren en la arquitectura celular de la matriz vegetal derivados de la WL y SG durante la DO se reflejan macroscópicamente en las propiedades fisicoquímicas del producto.

Tres productos hortofrutícolas osmodeshidratados, en solución de sacarosa (50 °Bx a 35 °C hasta por 240 min), mostraron que con la eliminación de agua (disminuye el contenido de humedad) la a_w del producto también reduce su tamaño y volumen en función del tiempo Figura 1-3.

Dependiendo de la composición de la solución hipertónica, la *SG* modificará el color, sabor y las propiedades nutricionales y funcionales del producto. Además, la *WL* concentra los pigmentos que proporcionan color a la matriz vegetal, lo que se puede apreciar como un incremento en la pureza e intensidad en el color del producto osmodeshidratado con respecto al producto fresco. En el caso de melón se presenta una transparencia derivada de la desgasificación total o parcial del aire en su tejido, que es sustituido por la solución hipertónica; por el contrario, en manzana y chayote no se observa esta transparencia, lo que puede deberse a la formación progresiva de una corteza de sacarosa en su superficie.

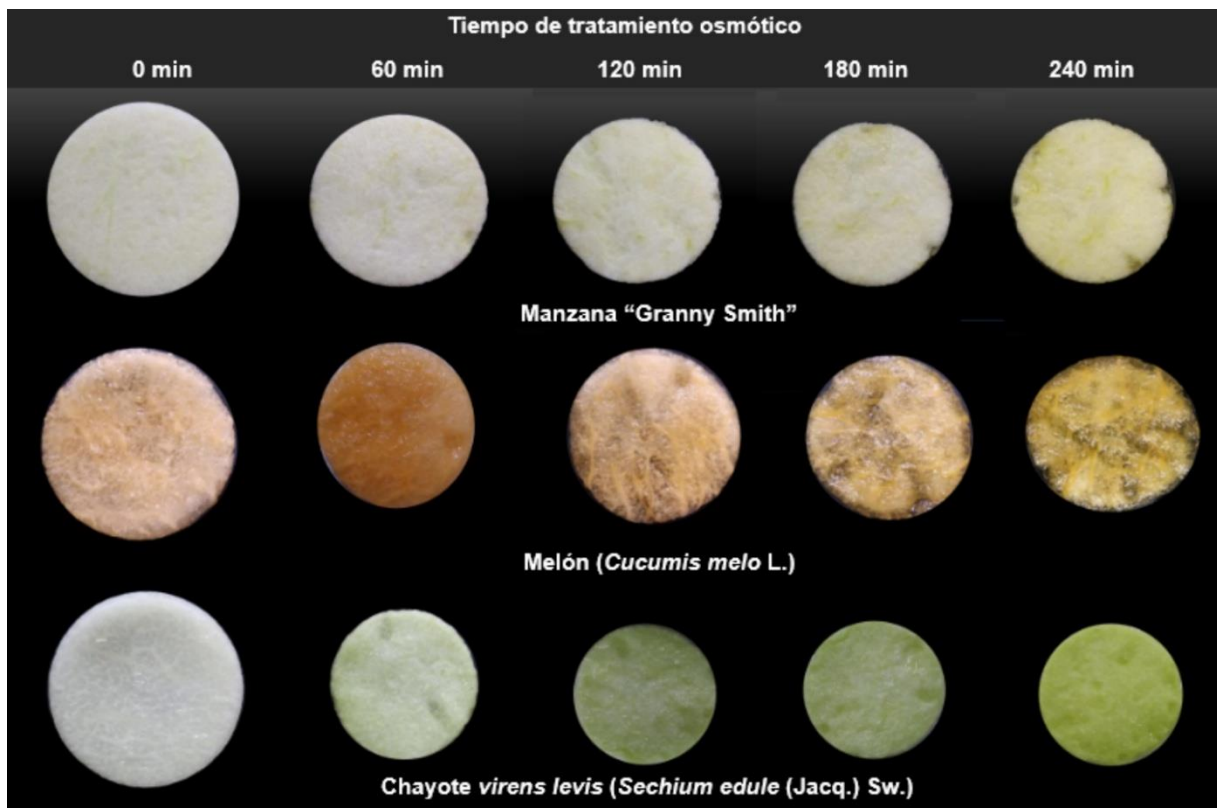


Figura 1-2. Cambios en la apariencia de tres productos hortofrutícolas a diferentes tiempos de osmodeshidratación con solución de sacarosa (50 % a 35 °C).

En conjunto, *WL* y *SG* disminuyen la elasticidad y porosidad del producto, que determinan su textura, resultando en un exterior firme e interior suave (Barragán-Iglesias, Rodríguez-Ramírez, Sablani, & Méndez-Lagunas, 2018).

1.5.3. Alimentos funcionales desarrollados por DO

Los alimentos funcionales son productos modificados por retirar o integrar algún compuesto bioactivo (como fibra dietaria, oligosacáridos, polioles, péptidos y proteínas, isoprenoides y vitaminas, bacterias ácido lácticas, minerales, ácidos grasos insaturados, fitoquímicos y antioxidantes) que haya demostrado científicamente que produce beneficios para el consumidor (Fuentes-Berrio, Acevedo-Correa, y Gelvez-Ordoñez, 2015). La DO permite alterar de manera controlada las características microestructurales de matrices vegetales al conferir la introducción de agentes conservantes, saborizantes, mejoradores de textura o compuestos bioactivos en su fracción porosa mediante el uso de soluciones hipertónicas multicomponentes. Derivado de esto, la DO se utiliza para desarrollar nuevos productos hortofrutícolas.

Jiménez-Hernández et al. (2017) deshidrataron rodajas de mango criollo impregnadas con emulsiones de oleorresina de chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *Aviculare*). Estas presentaron efecto antiproliferativo en líneas celulares de cáncer de mama MDA-MB-231, atribuido a la sinergia de la capsaicina del chile piquín y los componentes bioactivos de la pulpa de mango. Shukla, Shukla, Das & Goud (2019) deshidrataron rodajas de mango cv. Fazli impregnadas con emulsiones de oleorresina de jengibre (*Zingiber officinale*) para brindarle sabor picante y propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Los autores compararon ese producto con uno comercial, con características similares, y concluyeron que el pretratamiento osmótico mejoró la retención de vitamina C, fenoles totales y β -caroteno en 60.2, 76.8 y 85.6 %, respectivamente; además, redujeron el tiempo total de procesamiento hasta 376.7 %.

Aguirre-García et al. (2020) impregnaron compuestos antioxidantes de jugo de betabel en rodajas de manzana cv. Granny Smith. Los autores lograron incrementar hasta 46 y 115 % el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante, respectivamente, en comparación con el producto fresco. Barragán-Iglesias, Rodríguez-Ramírez, Sablani & Méndez-Lagunas (2018) deshidrataron cubos de papaya (*Carica papaya* L. cv. Maradol) impregnados con hidróxido de calcio (Ca(OH)_2).

El resultado fue un producto con exterior firme e interior suave y contracción y deformación reducidas; además, disminuyeron el tiempo de secado hasta 37 %.

Lovera, Ramallo, & Salvadori (2018) estudiaron el efecto de la impregnación de lactato de calcio ($C_6H_{10}CaO_6$) y gluconato de calcio ($C_{12}H_{22}CaO_{14}$) en cilindros de papaya en el tiempo de congelación del producto. Los resultados mostraron que la DO permite reducir el tiempo y costos de producción, ya que el tiempo de congelación de la fruta fresca, impregnada con calcio y osmodeshidratada fue de 23, 17 y 5 min en túnel y 118, 83 y 60 min en congelador doméstico, respectivamente.

La DO frecuentemente se combina con otras técnicas incrementar la tasa de transferencia de masa. En este sentido, la aplicación de alta presión hidrostática (HP) genera compresión y descompresión del producto, y da lugar a la desintegración celular, con lo que aumenta el índice de permeabilización celular (Z_p) y flujo másico durante el proceso osmótico. George, Selvan, & Rastogi (2016), osmodeshidrataron rodajas de manzana cv. Fuji con soluciones de sacarosa y extracto de kokum (*Garcinia indica*) combinando HP y DO; los resultados mostraron incremento significativo en la impregnación de antioxidantes de kokum por la combinación de HP y DO, con respecto al producto que fue procesado mediante DO.

La DO también ha sido acoplada a ultrasonido (US), proceso que se caracteriza por la vibración de aire en el intervalo de frecuencia de 20 a 100 MHz. El ultrasonido presenta dos mecanismos alternados: cavitación-compresión y expansión, los cuales provocan la erosión y descomposición de partículas superficiales del producto, y genera canales microscópicos. Maleki, Shahidi, Varidi, & Azarpazhooh (2020) aplicaron US previo a la DO de rodajas de zanahoria impregnadas con compuestos fenólicos de flor de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*), los resultados muestran que la máxima impregnación de compuestos fenólicos en el producto fue sin US, esto se atribuye a que tiempos prolongados de US dañaron los microcanales del tejido vegetal y disminuyeron el flujo másico durante la DO.

También se han utilizado presiones subatmosféricas durante 5 a 20 min. Esta técnica se conoce como impregnación al vacío (IV) y combinada con DO denomina deshidratación osmótica con pulsos de vacío (DOPV). Con DOPV (figura 1-4) se elimina el gas ocluido en los poros del tejido vegetal hasta lograr el equilibrio mecánico; una vez que es restaurada la presión atmosférica, la

solución externa ocupa los poros, lo que genera aumento de la superficie de contacto producto-solución hipertónica dentro de los espacios intercelulares del tejido vegetal, y ocasiona modificaciones estructurales de la DO (Figura 1-4b) a más células internas (Figura 1-4c), principalmente en el exterior del producto.

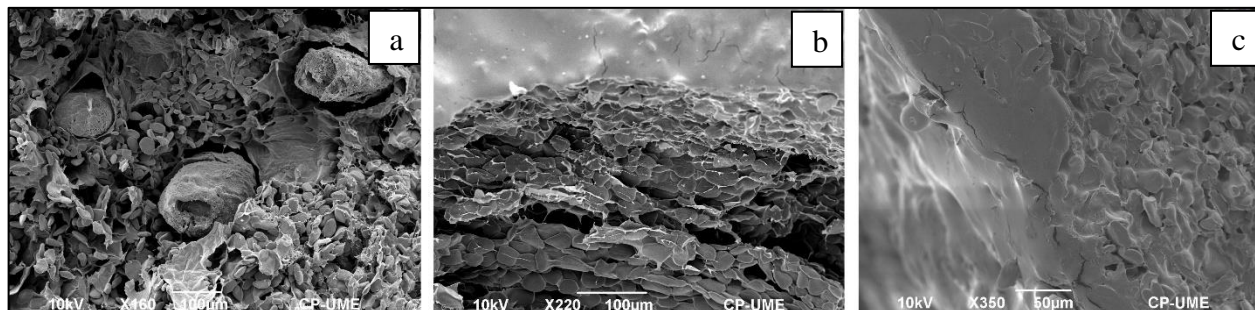


Figura 1-4. Micrografías SEM de la estructura de rodajas de banana (*Musa acuminata*) sin tratamiento osmótico; B) Rodajas con tratamiento osmótico a presión atmosférica con solución de sacarosa (50 %, 35 min a 35 °C) y C) Rodajas con tratamiento osmótico con 10 min de pulso de vacío con solución de sacarosa (50 %, 35 min a 35 °C).

A través de IV y DOPV se han formulado diversos productos hortofrutícolas impregnados con compuestos bioactivos (Cuadro 1-1).

La DOPV ha permitido enriquecer matrices vegetales con compuestos bioactivos solubles en agua (antioxidantes, vitaminas hidrosolubles, minerales, y otros materiales). También, se han impregnado bacterias probióticas viables como *Lactobacillus* (*L. plantarum*, *L. rhamnosus*, *L. salivarius*, *L. casei*, entre otros) con y sin tecnologías de barrera contra los efectos del jugo gástrico y ácido biliar del estómago. Incluso, se han utilizado emulsiones (micro y nanoemulsiones) para incorporar de compuestos bioactivos de naturaleza lipofílica (vitaminas liposolubles, aceites esenciales, oleorresinas) con aplicación limitada a productos ricos en grasas y aceites en alimentos ricos en agua, como frutas y hortalizas.

La aplicación de DOPV se ha evaluado en diversas matrices vegetales y se ha observado que un factor importante en la impregnación de solutos en el tejido vegetal es su ϵ_e , por lo que frecuentemente se aplica en manzana, mango, melón y papaya.

Cuadro 1-1. Matrices vegetales enriquecidas con ingredientes funcionales mediante impregnación al vacío o deshidratación osmótica asistida con pulsos de vacío.

Ingrediente funcional	Matriz vegetal
Minerales	Papas 'Toyoshiro' y 'Snowden' con pirofosfato férrico (Erihemu, Hironaka, Oda & Koaze, 2014).
Vitaminas	Triángulos de piña con cloruro de calcio dihidratado (Mateus de Lima et al., 2016).
Vitaminas	Rodajas de papa <i>Diacol Capiro</i> con vitamina E y C (Duarte-Correa et al., 2020).
Antioxidantes	Rodajas de mango <i>Tommy Atkins</i> con polifenoles de extracto de uva (Batista de Medeiros et al., 2019).
Antioxidantes	Cubos de manzana 'Golden Delicious' con jugo de limón 'Femminello Comune' (Santarelli et al., 2020).
Antioxidantes	Mitades de fresa <i>Alba</i> con jugo de arándano (Tylewicz et al., 2019).
Probióticos	Cubos de manzana <i>Royal Gala</i> con <i>Lactobacillus plantarum</i> . (Emser et al., 2017).
Probióticos	Rodajas de banano Tabasco con <i>Lactobacillus rhamnosus</i> (Huerta-Vera et al., 2017).
Probióticos	Aros de manzana 'Granny Smith' con <i>Lactobacillus salivarius</i> spp. <i>Salivarius</i> (Burca-Busaga, Betoret, Seguí, Betoret & Barrera, 2020).
Probióticos	Murta <i>Red Pearl-INIA</i> con <i>Lactobacillus casei</i> var. <i>rhamnosus</i> (Zura-Bravo et al., 2019).
Enzimas	Cubos de mango 'Kent' con pectin-metil-esterasa (PME) (Sulistyawati et al., 2018).

1.5.4. Estabilidad fisicoquímica de alimentos osmodeshidratados

La estabilidad fisicoquímica de productos hortofrutícolas osmodeshidratados e impregnados con ingredientes funcionales se ha evaluado durante almacenamiento. El enriquecimiento de matrices

vegetales con compuestos con capacidad antioxidante, que previenen el estrés oxidativo y el daño de estructuras celulares (ADN, proteínas y lípidos de membrana), es de interés porque podrían ayudar a prevenir enfermedades neurodegenerativas (Cömert & Gökmen, 2018).

Dermesonlouoglou, Chalkia, & Taoukis (2018) secaron por aire convectivo bayas de goji (*Lycium barbarum*) previamente osmodeshidratadas en solución concentrada de glicerol, maltodextrina, ácido ascórbico y cloruro de sodio (60 min a 55 °C), sus resultados muestran que la DO, como pretratamiento, permitió prolongar significativamente la vida de anaquel del producto hasta por 206 días (25°C) en comparación con 99 días para las muestras que no fueron pretratadas con DO.

Cichowska & Kowalska (2018) osmodeshidrataron cilindros de manzana cv. Braeburn en soluciones de sacarosa y jugo concentrado de bayas de aronia (*Aronia melanocarpa*) (120 min a 40 y 60 °C) y posteriormente los deshidrataron mediante liofilización o por aire convectivo, los envasaron al vacío en bolsas de polietileno y almacenaron (25, 35 y 45 °C) durante 7 y 12 meses. Los resultados mostraron estabilidad microbiológica durante y después del almacenamiento sin importar el método de secado, además, el pretratamiento osmótico indujo efecto termoprotector sobre el color del producto durante almacenamiento.

Giannakourou et al. (2019) osmodeshidrataron rodajas de pepino (*Cucumis sativus*) con soluciones hipertónicas de glicerol en combinación con 20 diferentes infusiones herbales (manzanilla (*Matricaria chamomilla* L.), orégano (*Origanum vulgare*), menta (*Mentha pulegium* L.), flores de jazmín (*Jasminum officinale*), cúrcuma (*Curcuma longa*), entre otras) ricas en compuestos fenólicos y evaluaron su calidad durante almacenamiento (37 °C). El producto osmotratado tuvo color, textura y evaluación microbiológica superior dos a casi cuatro veces respecto al producto no tratado.

El enriquecimiento de matrices vegetales con probióticos también se ha evaluado. Los probióticos son microorganismos vivos que, en cantidades adecuadas, inhiben la proliferación de bacterias patógenas, mejoran el proceso digestivo y la respuesta inmune adquirida del hospedero (Rascón et al., 2018). Emser et al. (2017) osmodeshidrataron cubos de manzana var. *Royal Gala* con soluciones de sacarosa o sorbitol (40 y 60 °Bx) conteniendo *L. plantarum*; los cubos de manzana almacenados a 4 °C por 6 días, se evaluaron mediante simulación digestiva. Esto demostró

viabilidad probiótica de 7 a 8 log₁₀ (UFC·g⁻¹) durante almacenamiento con una supervivencia de 7 log₁₀ (UFC·g⁻¹) durante simulación digestiva.

Cui et al. (2018) examinaron el efecto de secado con aire, mediante liofilización, mediante liofilización seguida de secado al vacío por microondas y secado al aire seguido de secado por explosión sobre las propiedades organolépticas y la viabilidad de *L. plantarum* impregnado en cubos de manzana cv. Fuji. El producto estuvo almacenado en bolsas de papel aluminio (25 °C por 120 días); los autores demostraron que las muestras liofilizadas con un subsecuente secado de microondas al vacío presentan mayor estabilidad bacteriana (7 log₁₀ UFC·g⁻¹), color y aceptación sensorial al término de almacenamiento en comparación con los otros métodos de secado.

Rascón et al. (2018) liofilizaron rodajas de banano var. *Tabasco* enriquecidas con *L. rhamnosus* utilizando una solución de sacarosa (50 °Bx) y evaluaron el efecto de la a_w (0.115 a 0.846) sobre la estabilidad probiótica del producto durante almacenamiento (25 °C por 42 días). Los resultados mostraron viabilidad bacteriana de 6 a 7 log₁₀ (UFC·g⁻¹ b.s.) con actividades de agua de 0.115 a 0.329, por un periodo máximo de 28 días.

Además de usarse para incorporar compuestos bioactivos, la DO también ha sido útil para incorporar agentes antimicrobianos y saborizantes a matrices vegetales. Akharume, Singh, Jaczynski, & Sivanandan (2018) secaron con aire convectivo rodajas de manzana var. *Golden Delicious* previamente osmódeshidratadas con solución de sacarosa (42 °Bx) y humo líquido refinado. Ellos evaluaron color, textura y carga microbiana durante almacenamiento por 150 días, en bolsas de polietileno con y sin vacío. Los resultados mostraron que las manzanas con pretratamiento osmótico con humo líquido refinado presentan una coloración marrón característica, mejores propiedades de textura y reducción microbiana significativa durante almacenamiento en comparación con las rodajas secadas por convección sin pretratamiento osmótico.

1.5.5. Perspectivas

Los estudios demuestran que a través de DO con o sin otras técnicas complementarias para conservación es posible obtener productos hortofrutícolas mínimamente procesados o deshidratados y enriquecidos con compuestos bioactivos, con estabilidad fisicoquímica aceptable

y suficiente para ejercer efecto benéfico al consumidor. Estos productos podrían incluirse en la categoría de alimentos funcionales, de las más innovadoras y dinámicas de la industria alimentaria. En 2019, el tamaño del mercado de alimentos funcionales se valoró en US \$177,770.00 millones (Valuates Reports, 2020).

El consumidor está cada vez más interesado en su salud y bienestar, por lo que busca en el mercado alimentos que se relacionan con un estilo de vida práctico y saludable. Como resultado, la demanda de alimentos funcionales ha incrementado. Sin embargo, los productos hortofrutícolas enriquecidos con componentes bioactivos mediante DO todavía enfrentan desafíos tecnológicos y oportunidades de investigación que incluyen: demostrar su estabilidad fisicoquímica durante almacenamiento y los mecanismos de absorción y metabolización del ingrediente activo en los modelos biológicos.

Además, es necesario el desarrollo de una política global que regule y supervise la producción y venta de alimentos funcionales a fin de proteger a los consumidores de comprar productos con supuestas atribuciones ó propiedades benéficas.

1.6.CONCLUSIONES

Las investigaciones relacionadas con DO permiten sugerir que la incorporación de compuestos bioactivos en matrices vegetales está regulada en forma entrópica por la membrana semipermeable de las células vegetales. Además, DO es un proceso complejo debido a la interacción de las variables relacionadas con él y la estructura celular de los materiales biológicos, que generalmente es heterogénea.

La DO con y sin la implementación de otras técnicas de procesamiento ha permitido la impregnación de vitaminas, minerales, antioxidantes, probióticos, antimicrobianos, saborizantes e incluso compuestos de naturaleza lipofílica en la fracción porosa de manzana, papaya, mango, banano, pepino, piña, papa, zanahoria, entre otros.

Estos nuevos productos podrían jugar un rol importante como alimentos funcionales con capacidad de ejercer beneficios adicionales al consumidor. No obstante, es preciso desarrollar estudios que vinculen diversas disciplinas científicas con la finalidad de implementar técnicas que garanticen

su estabilidad fisicoquímica durante almacenamiento y determinen la correcta absorción y metabolización de su ingrediente activo en el organismo.

1.7.LITERATURA CITADA

- Aguirre-García, M., Hernández-Carranza, P., Cortés-Zavaleta, O., Ruíz-Espinoza, H., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruíz-López, I. I. (2020). Mass transfer analysis of bioactive compounds in apple wedges impregnated with beetroot juice: A 3D modelling approach. *Journal of Food Engineering*, 282, 110003. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110003
- Ahmed, I., Qazi, I. M., & Jamal, S. (2016). Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 29–43. doi:10.1016/j.ifset.2016.01.003
- Akharume, F., Singh, K., Jaczynski, J., & Sivanandan, L. (2018). Microbial shelf stability assessment of osmotically dehydrated smoky apples. *LWT - Food Science and Technology*, 90, 61–69. doi: 10.1016/j.lwt.2017.12.012
- Al-Tayyar, N. A., Youssef, A. M., & Al-Hindi, R. R. (2020). Edible coatings and antimicrobial nanoemulsions for enhancing shelf life and reducing foodborne pathogens of fruits and vegetables: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 26, e00215. doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00215
- Arias, L., Perea, Y., & Zapata, J. E. (2017). Cinética de la transferencia de masa en la deshidratación osmótica de mango (*Mangifera indica* L.) var. Tommy Atkins en función de la temperatura. *Información Tecnológica*, 28, 47-58. doi: 10.4067/S0718-07642017000300006.
- Barragán-Iglesias, J., Rodríguez-Ramírez, J., Sablani, S. S., & Méndez-Lagunas, L. L. (2018). Texture analysis of dried papaya (*Carica papaya* L., cv. *Maradol*) pretreated with calcium and osmotic dehydration. *Journal Drying Technology*, 37, 906-919. doi: 10.1080/07373937.2018.1473420
- Batista de Medeiros, R. A., Da Silva Júnior, E. V., Fernandes da Silva, J. H., Da Cunha Ferreira Neto, O., Rupert Brandão, S. C., Pimenta Barros, Z. M., Sá da Rocha, O. R., & Moreira Azoubel, P. (2019). Effect of different grape residues polyphenols impregnation techniques in mango. *Journal of Food Engineering*, 262, 1–8. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.05.011

- Burca-Busaga, C. G., Betoret, N., Seguí, L., Betoret, E., & Barrera, C. (2020). Survival of *Lactobacillus salivarius* CECT 4063 and stability of antioxidant compounds in dried apple snacks as affected by the water activity, the addition of trehalose and high pressure homogenization. *Microorganisms*, 8, 1095. doi: 10.3390/microorganisms8081095
- Castro-Giráldez, M., Fito, P. J., & Fito, P. (2011). Nonlinear thermodynamic approach to analyze long time osmotic dehydration of parenchymatic apple tissue. *Journal of Food Engineering*, 102, 34–42. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.07.032
- Cichowska, J., & Kowalska, H. (2018). Effect of osmotic pre-treatment and temperature storage conditions on water activity and colour of dried apple. *International Journal of Food Engineering*, 14(2). doi: 10.1515/ijfe-2017-0158
- Cui, L., Niu, L., Li, D., Liu, C., Liu, Y., Liu, C., & Song, J. (2018). Effects of different drying methods on quality, bacterial viability and storage stability of probiotic enriched apple snacks. *Journal of Integrative Agriculture*, 17, 247–255. doi: 10.1016/S2095-3119(17)61742-8
- Cömert, E. D., & Gökmen. V. (2018). Evolution of food antioxidants as a core topic of food science for a century. *Food Research International*, 105, 76–93. doi: 10.1016/j.foodres.2017.10.056
- Dermesonlouoglou, E., Chalkia, A. & Taoukis, P. (2018). Application of osmotic dehydration to improve the quality of dried goji berry. *Journal of Food Engineering*, 232, 36-43. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.03.012
- Duarte-Correa, Y., Díaz-Osorio, A., Osorio-Arias, J., Sobral, P. J. A., & Vega-Castro, O. (2020). Development of fortified low-fat potato chips through vacuum impregnation and microwave vacuum drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 64, 102437. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102437
- Emser, K., Barbosa, J., Teixeira, P., & Bernardo de Moraes, A. M. M. (2017). *Lactobacillus plantarum* survival during the osmotic dehydration and storage of probiotic cut apple. *Journal of Functional Foods*, 38, 519–528. doi: 10.1016/j.jff.2017.09.021
- Erihemu., Hironaka, K., Oda, Y., & Koaze, H. (2014). Iron enrichment of whole potato tuber by vacuum impregnation. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 504-509. doi: 10.1016/j.lwt.2014.04.043
- Ferreira dos Santos, S., Vieira Cardoso, R. C., Pereira Borges, I. M., Costel e Almeida, A., Sodré Andrade, E., Ormonde Ferreira, I., & Do Carmo Ramos, L. (2020). Post-harvest losses of

- fruits and vegetables in supply centers in Salvador, Brazil: Analysis of determinants, volumes and reduction strategies. *Waste Management*, 101, 161-170. doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.007.
- Fito, P., LeMaguer, M., Betoret, N., & Fito, P.J. (2007). Advanced food process engineering to model real foods and processes: the “SAFES” methodology. *Journal of Food Engineering*, 83, 173–185. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.02.017
- Flores-Andrade, E., Beristain, C. I., Vernon-Carter, E. J., Gutiérrez G. F., & Azuara, E. (2009). Enthalpy-entropy compensation and water transfer mechanism in osmotically dehydrated agar gel. *Drying Technology: An International Journal*, 27, 999-1009. doi: 10.1080/07373930902904921
- Fuentes-Berrio, L., Acevedo-Correa, D., & Gelvez-Ordoñez, V. M. (2015). Alimentos funcionales: Impacto y retos para el desarrollo y bienestar de la sociedad colombiana. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2), 140-149. doi:10.18684/BSAA(13)140-149
- George, J. M., Selvan, T. S., & Rastogi, N. K. (2016). High-pressure-assisted infusion of bioactive compounds in apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 33, 100-107. doi: 10.1016/j.ifset.2015.11.010
- Giannakourou, M., Strati, I. F., Kriebardis, A. G., Mantanika, V., Poulis, S., Zoumpoulakis, P., & Sinanoglou, V. J. (2019). Shelf life extension and quality improvement of cucumber slices impregnated in infusions of edible herbs. *Journal Analytical Letters*, 52, 2677-2691. doi: 10.1080/00032719.2019.1589476
- González-Pérez, J. E., López-Méndez, E. M., Luna-Guevara, J. J., Ruíz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruíz-López, I. I. (2019). Analysis of mass transfer and morphometric characteristics of white mushroom (*Agaricus bisporus*) pilei during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 240, 120–132. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.07.026
- Huerta-Vera, K., Flores-Andrade, E., Pérez-Sato, J. A., Morales-Ramos, V., Pascual-Pineda, L. A., & Contreras-Oliva, A. (2017). Enrichment of banana with *Lactobacillus rhamnosus* using double emulsion and osmotic dehydration. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1053-1062. doi: 10.1007/s11947-017-1879-2
- Jiménez-Hernández, J., Estrada-Bahena, E. B., Maldonado-Astudillo, Y. I., Talavera-Mendoza, O., Arámbula-Villa, G., & Azuara, E. (2017). Osmotic dehydration of mango with

- impregnation of inulin and piquin-pepper oleoresin. *LWT - Food Science and Technology*, 79, 609-615. doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.016
- Lech, K., Michalska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P., & Figiel, A. (2018). The influence of physical properties of selected plant materials on the process of osmotic dehydration. *LWT - Food Science and Technology*, 91, 588–594. doi: 10.1016/j.lwt.2018.02.012
- Legland, D., Devaux, M.F., Bouchet, B., Guillon, F., & Lahaye, M. (2012). Cartography of cell morphology in tomato pericarp at the fruit scale. *Journal of Microscopy*, 247 (1), 78–93. doi: 10.1111/j.1365-2818.2012.03623.x
- Lovera, N. N., Ramallo, L., & Salvadori, V. O. (2018). Effects of different freezing methods on calcium enriched papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 55, 2039-2047. doi: 10.1007/s13197-018-3118-x
- Maleki, M., Shahidi, F., Varidi, M. J. & Azarpazhooh, E. (2020). Hot air drying kinetics of novel functional carrot snack: Impregnated using polyphenolic rich osmotic solution with ultrasound pretreatment. *Journal of Food Process Engineering*, 43, e13331. doi: 10.1111/jfpe.13331
- Mateus de Lima, M., Tribuzi, G., Ribeiro de Souza, J. A., Gonçalves de Souza, J. A., Borges Laurindo, J. & Mattar Carciofi, B. A. (2016). Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified pineapple snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 72, 501-509. doi: org/10.1016/j.lwt.2016.05.016
- Mauro, M. A., Dellarosa, N., Tylewicz, U., Tappi, S., Laghi, L., Rocculi, P., & Rosa, M. D. (2016). Calcium and ascorbic acid affect cellular structure and water mobility in apple tissue during osmotic dehydration in sucrose solutions. *Food Chemistry*, 195, 19-28. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.04.096
- Mavroudis, N. E., Dejmek, P., & Sjöholm, I. (2004). Studies on some raw material characteristics in different Swedish apple varieties. *Journal of Food Engineering*, 62, 121-129, doi: 10.1016/S0260-8774(03)00200-0
- Qiu, L., Zhang, M., Tang, J., Ahikari, B., & Cao, P. (2019). Innovative technologies for producing and preserving intermediate moisture foods: A review. *Food Research International*, 116, 90–102. doi: 10.1016/j.foodres.2018.12.055
- Rascón, M.P., Huerta-Vera, K., Pascual-Pineda, L. A., Contreras-Oliva, A., Flores-Andrade, E., Castillo-Morales, M., Bonilla, E., & González-Morales, I. (2018). Osmotic dehydration

- assisted impregnation of *Lactobacillus rhamnosus* in banana and effect of water activity on the storage stability of probiotic in the freeze-dried product. *LWT - Food Science and Technology*, 92, 490–496. doi: 10.1016/j.lwt.2018.02.074
- Santarelli, V., Neri, L., Sacchetti, G., Di Mattia, C. D., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2020). Response of organic and conventional apples to freezing and freezing pretreatments: Focus on polyphenols content and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 308, 125570. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125570
- Sawicka, B. (2019). Post-harvest Losses of Agricultural Produce. *Sustainable development*, 1(1), 1-16. doi:10.1007/978-3-319-69626-3_40-1
- Seguí, L., Fito, P. J., & Fito, P. (2012). Understanding osmotic dehydration of tissue structured foods by means of a cellular approach. *Journal of Food Engineering*, 110, 240–247. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.05.012
- Shukla, A., Shukla, R. S., Das, C., & Goud, V. V. (2019). Gingerols infusion and multi-step process optimization for enhancement of color, sensory and functional profiles of candied mango. *Food Chemistry*, 300, 125195. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125195
- Sulistyawati, I., Dekker, M., Fogliano, V., & Verkerk, R. (2018). Osmotic dehydration of mango: effect of vacuum impregnation, high pressure, pectin methylesterase and ripeness on quality. *LWT - Food Science and Technology*, 98, 179–186. doi: 10.1016/j.lwt.2018.08.032
- Tylewicz, U., Mannozi, C., Romani, S., Castagnini, J. M., Samborska, K., Rocculi, P., & Rosa, M. D. (2019). Chemical and physicochemical properties of semi-dried organic strawberries enriched with bilberry juice-based solution. *LWT - Food Science and Technology*, 114, 108377. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108377
- Valuates Reports. (2020) Functional Food Market by Ingredient (Probiotics, Minerals, Proteins & Amino Acids, Prebiotics, & Dietary Fibers, Vitamins and Others), Product (Bakery & Cereals, Dairy Products, Meat, Fish & Eggs, Soy Products, Fats & Oils and Others), Application (Sports Nutrition, Weight Management Clinical Nutrition, Cardio Health, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast 2021–2027. Bangalore, India. Recuperado de <https://reports.valuates.com/market-reports/ALLI-Manu-4H22/functional-food>
- Winisdorffer, G., Musse, M., Quellec, S., Barbacci, A., Le Gall, S., Mariette, F., & Lahaye, M. (2015). Analysis of the dynamic mechanical properties of apple tissue and relationships with

- the intracellular water status, gas distribution, histological properties and chemical composition analysis of the dynamic mechanical properties of apple tissue and relationships with the intracellular water status, gas distribution, histological properties and chemical composition. *Postharvest Biology and Technology*, 104, 1-16. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.02.010
- Xiao, M., Bi, J., Yi, J., Zhao, Y., Peng, J., Zhou, L., & Chen, Q. (2018). Osmotic pretreatment for instant controlled pressure drop dried apple chips: Impact of the type of saccharides and treatment conditions. *Drying Technology*, 37 (7), 1-10. doi: 10.1080/07373937.2018.1473419
- Yousuf, B., Shafiq Qadri, O., & Kumar Srivastava, A. (2018). Recent developments in shelf-life extension of fresh-cut fruits and vegetables by application of different edible coatings: A review. *LWT - Food Science and Technology*, 89, 198–209. doi: org/10.1016/j.lwt.2017.10.051.
- Zhang, W., Zhao, S., Zhang, L., Xing, Y., & Jia, W. (2020). Changes in the cell wall during fruit development and ripening in *Fragaria vesca*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 154, 54–65. doi: 10.1016/j.plaphy.2020.05.028
- Zura-Bravo, L., Rodríguez, A., Stucken, K., Castillo, L., Ah-Hen, K. S., García-Segovia, P., & Vega-Gálvez, A. (2019). Nutritional and organoleptic properties of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries impregnated with *Lactobacillus casei* var. *rhamnosus* and dehydrated by different methods. *Food Chemistry*, 299, 125117. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125117

CAPÍTULO II

FACTORES QUE AFECTAN LA CINÉTICA DE TRANSFERENCIA DE MASA DE CHAYOTE (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE

2.1 RESUMEN

El objetivo de este estudio fue aplicar deshidratación osmótica para producir rodajas de chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz) mínimamente procesado. La hipótesis es que las variables asociadas al proceso afectan las propiedades fisicoquímicas del producto final. Así, los factores evaluados fueron la concentración de la solución osmótica, la temperatura, el tiempo de procesamiento y la aplicación de pulso de vacío en la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica del fruto. La cinética de pérdida de agua (*WFL*), ganancia de sólidos (*SG*) y actividad del agua (a_w) se obtuvieron utilizando soluciones de sacarosa con 40, 50 y 60 °Bx a 25, 35 y 45 °C. La concentración de la solución osmótica, la temperatura y el tiempo de procesamiento tuvieron mayor influencia que la aplicación de pulso de vacío sobre *WL* y *SG*. La temperatura sobre la difusividad efectiva presentó dependencia de tipo Arrhenius. El chayote osmodeshidratado presenta menor a_w (hasta 0.846), mayor contenido SST (hasta 31.9°Bx) y color más puro e intenso respecto a testigo. Los presentes hallazgos permiten sugerir que la DO permite obtener chayote mínimamente procesado que podría incluirse a productos de cocción rápida, como ensaladas o mezclas de sopas.

Palabras clave: pulso de vacío, actividad de agua, energía de activación, color, cambios de volumen, modelos empíricos de estimación

2.2 INTRODUCCIÓN

El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz) pertenece a la familia Cucurbitaceae originaria de América Central. El fruto fresco contiene 89 a 95 % de agua y potasio, calcio, fósforo, magnesio y, azúcares totales de 2.0 a 3.6 %; además, están presentes aminoácidos (ácido glutámico, aspártico, leucina), vitaminas (C, K, A), ácido fólico entre otros componentes. El fruto de chayote presenta contenido calórico de 19 a 31 Kcal 100 g⁻¹ (base seca), que se considera bajo (Vieira *et al.*, 2019; Cadena-Iñiguez *et al.*, 2019). Estas características lo hacen particularmente apropiado para consumir por humanos con ciertos padecimientos clínicos y usarlo en la industria alimentaria

(alimentos para bebés, jugos, salsas y platos de pasta). Adicionalmente, el chayote es fuente de compuestos bioactivos (saponinas, ácidos fenólicos, flavonoides, triterpenos y fitoesteroles) (Aguñiga-Sánchez *et al.*, 2015; Cadena-Iñiguez *et al.*, 2007; Shafirany *et al.*, 2018; Ordoñez *et al.*, 2006). Los beneficios potenciales de estos compuestos bioactivos en la salud de humanos han recibido amplia atención y se han evaluado en modelos animales e *in vitro*; así, se ha demostrado su actividad antioxidante (Ordoñez *et al.*, 2006), antibacteriana (Frías Tamayo *et al.*, 2016), antihipertensiva (Shafirany *et al.*, 2018), antiepiléptica (Firdous *et al.*, 2012) y anticancerígena (Aguñiga-Sánchez *et al.*, 2015).

Sin embargo, a pesar de que la demanda del fruto fresco se ha incrementado en los últimos años, la exportación a mercados distantes se ve limitada debido a que el embrión germina prematuramente estando el fruto aun adherido a la planta. Esta característica, acelera su deterioro y reduce calidad y valor comercial (Cadena- Iñiguez *et al.*, 2007). Para diversificar los usos de esta especie deben desarrollarse productos nuevos, con valor agregado que ofrezcan una alternativa a los productores de chayote. Una forma de extender la vida útil del chayote es reduciendo contenido de agua. El secado con aire es la técnica más utilizada para mejorar la estabilidad de frutas y vegetales. Sin embargo, esta técnica puede provocar la degradación de nutrientes y la pérdida de cualidades sensoriales. En este sentido, la deshidratación osmótica (DO) permite producir chayote parcialmente deshidratado con potencial aplicación como ingrediente o producto mínimamente procesado. Además, la DO mejora las características de calidad como color, textura y sabor del producto final, y reduce los requisitos de energía para secado térmico subsecuente (Barragán-Iglesias *et al.*, 2018; Dermesonlouoglou *et al.*, 2018). Esta técnica consiste en sumergir un tejido celular en solución hipertónica para promover la pérdida de agua (*WL*) de las células y lograr la ganancia de soluto osmótico (*SG*) en los espacios intercelulares y células externas cortadas del tejido vegetal (Chiralt y Fito, 2001).

El proceso se lleva a cabo a presión atmosférica o presión subatmosférica en un proceso denominado deshidratación osmótica al vacío pulsada (DOPV). La reducción de la presión promueve la eliminación del gas ocluido en los poros del producto. Cuando se restablece la presión atmosférica, el gas residual en los poros se comprime y la solución hipertónica fluye hacia los poros a través de un mecanismo hidrodinámico (HDM). Este mecanismo aumenta la superficie

disponible para la transferencia de masa debido a la diferencia de presión (Fito 1994; Corrêa *et al.*, 2014; De Jesus Junqueira *et al.*, 2018).

La DO está influenciada por variables asociadas al proceso como composición y concentración del agente osmótico, temperatura, tiempo de inmersión, presencia o ausencia de agitación en el medio osmótico (Corrêa *et al.*, 2014; Ito *et al.*, 2007; Lombard *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2007); además, las características del producto como especie, variedad, etapa de maduración, propiedades fisicoquímicas y estructura del tejido también tiene efecto (Junqueira *et al.*, 2020).

La DO es un proceso de difusión regulado de manera entrópica por la estructura de las células vegetales y está relacionado con los cambios microestructurales que experimentan derivado de la WL y SG (Flores *et al.*, 2009). Este proceso puede modelarse con base en la segunda ley de Fick, que considera que la resistencia externa a la transferencia de masa es insignificante en comparación con la resistencia interna. Generalmente se asume que la difusividad de masa es constante a lo largo del proceso. Sin embargo, si el producto presenta encogimiento durante la DO, la difusividad de masa también puede variar. En este contexto, Azuara *et al.* (1992) proponen un modelo basado en la segunda ley de Fick, que contempla la difusión unidimensional no estable a través de una placa/rodaja delgada considerando la variación de difusión efectiva durante el proceso osmótico. La difusión de agua y solutos a contracorriente en el alimento durante la DO reduce la actividad de agua (a_w) e incrementan los sólidos solubles totales (SST) del producto final (De Mello Jr *et al.*, 2019; Schincariol Paes *et al.*, 2019). La a_w se relaciona con el agua disponible en los alimentos para el crecimiento microbiano y el desarrollo de reacciones bioquímicas de deterioro que afectan la calidad de los productos. Por ello, la disminución de la a_w es primordial para mejorar la estabilidad de los alimentos. Mientras que, la incorporación de solutos modifica el color, textura y características sensoriales del producto (Assis *et al.*, 2016). Así, el uso de modelos empíricos es una herramienta útil que podría predecir la a_w y el contenido de SST de chayote osmodeshidratado y proporcionar información para diseñar y optimizar un método de DO en función de las características sensoriales y fisicoquímicas que se deseen en el producto final.

La información relacionada con procesos de deshidratación de chayote es limitada. Aunque el efecto del pretratamiento de DO en el secado al aire de chayote lo evaluaron Ruíz-López *et al.* 2010, parece que no hay información de la influencia de las variables del proceso en las

características del chayote deshidratado osmóticamente. Conocer el impacto de la DO y las condiciones del proceso en las propiedades fisicoquímicas del chayote permitirá obtener frutos osmodeshidratados, que podrían ser utilizados como producto de cocción rápida o ingrediente para ensaladas y mezclas de sopas. Por lo anterior, los objetivos de este estudio fueron (i) evaluar el efecto de la concentración de la solución osmótica, temperatura, tiempo de procesamiento y aplicación de pulso de vacío en la transferencia de masa, difusividad efectiva, actividad del agua, sólidos solubles totales, color y contracción volumétrica de rodajas de chayote durante la deshidratación osmótica y (ii) evaluar la aplicación de un modelo empírico en la predicción de la actividad de agua y el contenido de sólidos solubles totales durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Material vegetal

Frutos de chayote var. *virens levis* procedentes de Huatusco, Veracruz, México se cosecharon 33-35 días después de antesis. Los frutos lavados con solución de hipoclorito de sodio (0.1%) se almacenaron a 8 ± 1 °C durante menos de 15 días hasta su estudio. Los frutos tuvieron humedad de 91.25 ± 0.79 kg 100 kg⁻¹ (base húmeda), a_w de 0.981 ± 0.004 y contenido de sólidos solubles totales de 5.07 ± 0.43 %. El color se midió con un colorímetro (KONICA MINOLTA®, mod. CR-400, Japón) y los valores obtenidos fueron de $L^* = 74.04 \pm 0.43$, $a^* = -1.40 \pm 0.17$ y $b^* = 10.49 \pm 0.47$.

2.3.2. Preparación de muestras y proceso osmótico

Los frutos de chayote se pelaron y se seccionaron axialmente en rodajas de 39 mm de diámetro y 3.9 mm de espesor. Cada rodaja se pesó y se sumergió en soluciones de sacarosa (40, 50 y 60°Bx) a 25, 35 y 45 °C, manteniendo una proporción de 1:20 (p / p) fruto: solución. Estos ensayos se realizaron sin modificar la presión atmosférica y presión atmosférica disminuida, o con vacío (DOPV). Para los tratamientos de DOPV, estufa de vacío (Heraeus, mod. D-6450 Hanau, Alemania) se acopló a bomba de vacío (Labconco mod. No.117, US.) y la presión de vacío alcanzó 115 mbar al sistema durante los primeros 15 minutos. Después se restableció la presión atmosférica. Las muestras evaluadas se retiraron de la solución después de 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 300 min. Luego, el proceso osmótico se detuvo por inmersión de cada muestra en agua destilada fría durante 10 s. El exceso de agua de la superficie se eliminó suavemente con papel

absorbente. Las muestras se pesaron y el contenido de humedad se determinó después de deshidratarlas en un horno con vacío (Heraeus, mod. D-6450 Hanau, Alemania), a 60 °C durante 24 h. Los cambios de volumen de las rodajas de chayote debidos a la deshidratación osmótica se evaluaron mediante el cambio del diámetro, que se midió con Vernier digital (Trupper®, México) y el espesor, que se midió con micrómetro digital (Mitutoyo Digimatic Micrometer No. 293-721, Los Ángeles, CA, US.). También se midió, a_w (con un medidor de actividad de agua Novasina LabMASTER, mod. Standar, US.), sólidos solubles totales (con equipo ATAGO, PAL-1, Japón) y los parámetros de color (con el sistema KONICA MINOLTA®, mod. CR-400, Japón); con estos últimos se calcularon croma y ángulo de tono (McGuire, 1992). Todos los análisis se realizaron por triplicado.

2.3.3. Modelos matemáticos

El cálculo de WL y SG durante la deshidratación osmótica de las rodajas con respecto a su masa inicial (M_o) se realizó con las ecuaciones (1) y (2) (Beristain *et al.*, 1990):

$$WL = \frac{M_o X_o - M_t X_t}{M_o} \quad (1)$$

$$SG = \frac{M_o(X_o - 1) - M_t(X_t - 1)}{M_o} \quad (2)$$

Donde, M_o es la masa inicial del alimento al tiempo 0, M_t es la masa del alimento al tiempo t , X_o es la humedad inicial (base húmeda) y X_t es la humedad final del alimento (base húmeda) durante el tiempo t .

La cinética de WL y SG en las rodajas durante la deshidratación osmótica fue modelada de acuerdo con las ecuaciones (3) y (4), desarrollados por Azuara *et al.* (1992):

$$WL = \frac{s_1 t WL_\infty}{1 + s_1 t} \quad (3)$$

$$SG = \frac{s_2 t SG_\infty}{1 + s_2 t} \quad (4)$$

Los coeficientes aparentes de difusión del agua y sólidos en los periodos de tiempo evaluados fueron calculados a partir de los datos de WL y SG , para esto se utilizó el modelo de Azuara *et al.* (1992) para alimentos en forma de placa, con las ecuaciones (5) y (6):

$$D_w = \frac{\pi l^2}{4t} \left[\left(\frac{s_1 t}{1 + s_1 t} \right) \left(\frac{WL_\infty^{mod}}{WL_\infty^{exp}} \right) \right]^2 \quad (5)$$

$$D_s = \frac{\pi l^2}{4t} \left[\left(\frac{s_2 t}{1 + s_2 t} \right) \left(\frac{SG_\infty^{mod}}{SG_\infty^{exp}} \right) \right]^2 \quad (6)$$

Donde, WL es la fracción de agua perdida por el alimento al tiempo t , SG es la fracción de sólidos ganados por el alimento al tiempo t , WL_∞ es la fracción de agua pérdida por el alimento en el equilibrio, SG_∞ es la fracción de sólidos ganados por el alimento en el equilibrio, s_1 es la constante relacionada con la velocidad de pérdida de agua (min^{-1}) y s_2 la constante relacionada con la velocidad de entrada de sólidos solubles en el alimento (min^{-1}). Los parámetros s_1 y s_2 y los valores en equilibrio WL_∞ y SG_∞ de las ecuaciones (3) y (4) fueron estimadas por regresión no lineal utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt implementado en el software KaleidaGraph 4.5 (Synergy, USA).

Los valores calculados de D_w o D_s se ajustaron a la ecuación de tipo Arrhenius para calcular la energía de activación utilizando la ecuación (7):

$$D_w \text{ o } D_s = D_o \exp \{ - E_a / R (T + 273.15) \} \quad (7)$$

D_o es el coeficiente de difusión de referencia, E_a es la energía de activación (kJ / mol), R es la constante universal de los gases (8.314 kJ / mol K) y T es la temperatura (K).

La representación lineal de la ecuación (8) es:

$$\ln D_w \text{ or } D_s = \ln D_o + [- E_a / R (T + 273.15)] \quad (8)$$

2.3.4. Cuantificación de a_w y sólidos solubles totales (SST)

Para cuantificar a_w y SST durante la deshidratación osmótica de rodajas dependiente del tiempo, los datos experimentales se ajustaron con las ecuaciones (9) y (10), con los modelos empíricos DR-Hill y Rational Model respectivamente, implementados en el software CurveExpert Profesional 2.6.5.

$$a_w = \alpha + \frac{\theta x^\eta}{\kappa^\eta + x^\eta} \quad (9)$$

$$^{\circ}Brix = \frac{a + bx}{1 + cx + dx^2} \quad (10)$$

Donde α , θ , κ y η son parámetros asociados al modelo empírico DR-Hill, y a , b , c y d son parámetros asociados al modelo empírico Rational Model y x es el tiempo (min).

2.3.5. Diseño experimental

Todas las evaluaciones se hicieron por triplicado, y los resultados se presentan como medias \pm desviación estándar de las repeticiones. Para todos los experimentos se implementó un diseño experimental factorial 3 x 3 x 2. Los niveles de los factores fueron: concentración de solución osmótica (40, 50 y 60 °Bx), temperatura (25, 35 y 45 °C) y pulso de vacío (0 y 115 mbar). Todos los datos se analizaron con el software KaleidaGraph 4.5 (Synergy, US.) aplicando ANDEVA, con significancia del 0.05. La significancia de las diferencias entre los grupos se evaluó mediante la prueba de Tukey.

Para determinar la idoneidad y bondad de ajuste en los modelos se eligieron: el coeficiente de determinación (R^2), chi-cuadrado (χ^2) y raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los valores de χ^2 , R^2 y RMSE se evaluaron con las ecuaciones (11) - (13).

$$\chi_{\text{cal}}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - E_i)^2}{(E_i)} \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - E_i)^2}{(O_i - \bar{E}_i)^2} \quad (12)$$

$$\text{RSME} = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Donde N es el número total de valores de datos utilizados para ajustar la ecuación, O_i and E_i son los valores del modelo experimental y previsto, respectivamente. \bar{E}_i es el promedio de todos los datos experimentales.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1. Cinéticas de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica

Los valores altos de R^2 y los valores bajos tanto de χ^2 como de RMSE del modelo de Azuara permiten sugerir la idoneidad del modelo para describir las cinéticas de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica, sin modificar la presión atmosférica del chayote (DO) y con aplicación de pulso de vacío (DOPV) (Cuadro 2-1). Los valores de WL y SG incrementaron en forma no lineal en todos los tratamientos osmóticos.

Cuadro 2-1. Parámetros cinéticos del modelo de Azuara para pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico.

Proceso	° Bx	Temperatura (°C)	s_1 (min ⁻¹)	WL_{∞}	R^2	χ^2 (x10 ⁻³)	RMSE (x10 ⁻³)	s_2 (min ⁻¹)	SG_{∞}	R^2	χ^2 (x10 ⁻³)	RMSE (x10 ⁻³)
DO	40	25	0.0189 ± 0.0009	0.5852 ± 0.0066	0.9954	4.32	3.19	0.0412 ± 0.0010	0.0804 ± 0.0004	0.9880	0.76	0.71
		35	0.0257 ± 0.0007	0.6703 ± 0.0074	0.9929	6.33	4.85	0.0592 ± 0.0021	0.0838 ± 0.0001	0.9777	0.14	0.37
		45	0.0482 ± 0.0007	0.6848 ± 0.0043	0.9886	3.16	4.79	0.0618 ± 0.0015	0.0856 ± 0.0007	0.9954	1.03	0.85
	50	25	0.0225 ± 0.0001	0.8064 ± 0.0034	0.9959	4.38	4.41	0.0574 ± 0.0012	0.0840 ± 0.0005	0.9909	0.26	0.52
		35	0.0314 ± 0.0004	0.8136 ± 0.0006	0.9910	5.81	6.38	0.0678 ± 0.0019	0.0868 ± 0.0008	0.9966	0.22	0.49
		45	0.0438 ± 0.0006	0.8092 ± 0.0085	0.9940	2.51	3.64	0.0690 ± 0.0006	0.0916 ± 0.0001	0.9893	0.84	0.85
	60	25	0.0301 ± 0.0002	0.8401 ± 0.0011	0.9925	7.33	6.16	0.0639 ± 0.0017	0.0844 ± 0.0008	0.9907	0.25	0.44
		35	0.0486 ± 0.0005	0.8700 ± 0.0004	0.9946	2.90	4.72	0.0609 ± 0.0010	0.0896 ± 0.0002	0.9919	0.31	0.50
		45	0.0684 ± 0.0009	0.8506 ± 0.0037	0.9983	0.66	2.16	0.0863 ± 0.0013	0.0994 ± 0.0003	0.9919	0.26	0.53
DOPV	40	25	0.0182 ± 0.0002	0.6070 ± 0.0019	0.9904	3.54	4.66	0.0474 ± 0.0023	0.0806 ± 0.0009	0.9857	0.33	0.57
		35	0.0247 ± 0.0006	0.7423 ± 0.0059	0.9943	2.02	3.88	0.0672 ± 0.0009	0.0871 ± 0.0005	0.9964	0.16	0.43
		45	0.0568 ± 0.0010	0.7324 ± 0.0023	0.9904	1.03	3.74	0.0743 ± 0.0005	0.0877 ± 0.0009	0.9980	0.08	0.34
	50	25	0.0244 ± 0.0004	0.8035 ± 0.0035	0.9960	1.92	3.72	0.0599 ± 0.0008	0.0881 ± 0.0006	0.9867	0.50	0.73
		35	0.0407 ± 0.0003	0.8081 ± 0.0029	0.9832	5.77	6.98	0.0690 ± 0.0014	0.0895 ± 0.0019	0.9979	0.07	0.34
		45	0.0433 ± 0.0005	0.8417 ± 0.0003	0.9904	2.98	5.14	0.0788 ± 0.0008	0.0915 ± 0.0006	0.9973	0.04	0.25
	60	25	0.0387 ± 0.0003	0.8330 ± 0.0028	0.9879	4.74	6.23	0.0607 ± 0.0011	0.0908 ± 0.0002	0.9852	0.21	0.54
		35	0.0455 ± 0.0004	0.8814 ± 0.0019	0.9957	1.13	3.47	0.0547 ± 0.0014	0.0942 ± 0.0007	0.9949	0.12	0.43
		45	0.0730 ± 0.0013	0.8679 ± 0.0036	0.9951	0.50	2.86	0.0881 ± 0.0005	0.0994 ± 0.0006	0.9832	0.10	0.42

Valores promedio ± desviación estándar (n=3). DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV, deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 10 min.

Al inicio del tratamiento la velocidad de transferencia de masa fue la mayor y disminuyó con el tiempo, lo que indicó que el sistema alcanzó un estado de pseudoequilibrio debido a la disminución de los potenciales químicos del agua y soluto entre el chayote y la solución osmótica.

La *WL* se afectó positivamente por la temperatura y la concentración de la solución osmótica. Esto indica que al aumentar cualquiera de estos parámetros se acelera la *WL* del chayote durante DO y DOPV. La *WL* se favoreció con concentraciones mayores de solución, debido a que la gran cantidad de soluto incrementa la presión osmótica (Figura 2-1). Corrêa *et al.* (2014) y Lombard *et al.* (2008) estudiaron la DO y DOPV de rodajas de guayaba y cilindros de piña en soluciones de sacarosa de sacarosa (35 a 65°Bx). Ellos observaron que el incremento de la concentración en la solución de sacarosa promueve la *WL*.

Las temperaturas mayores aumentaron la velocidad de *WL* del chayote en los primeros minutos del proceso. Estos resultados corroboran los valores de los parámetros cinéticos s_1 obtenidos con el modelo de Azuara. Es posible que la reducción de la viscosidad del medio osmótico y la modificación de las propiedades viscoelásticas del producto se deban al hinchamiento y plastificación de las membranas celulares; esto resulta en mayor transferencia de masa. Ito *et al.* (2007) reportaron el efecto positivo del incremento de la temperatura (20 a 40 °C) en las cinéticas de rodajas de mango osmódeshidratado en soluciones de sacarosa (45 a 60 °Bx) y DOPV. Los resultados de Ruíz-López *et al.* (2011) y Abraão *et al.* (2013) en la *WL* de rodajas de carambola y cilindros de calabaza, tratados osmóticamente en solución de sacarosa (40 a 60 °Bx), también incrementaron con la temperatura (40 a 75 °C).

El pulso de vacío aplicado al inicio del proceso osmótico también provocó aumento en el *WL* del chayote. Presión menor a la estándar provoca la liberación del gas ocluido en los espacios intercelulares de los tejidos, mientras que cuando se reestablece la presión atmosférica, los espacios intercelulares vacíos se llenan con solución osmótica. Esto aumenta el área de superficie de transferencia de masa disponible. Los resultados fueron similares a los observados por Batista de Medeiros *et al.* (2019) en tratamiento osmótico, con rectángulos de mango en solución de sacarosa (50°Bx) a 30 °C y un pulso de vacío de 200 a 300 mbar.

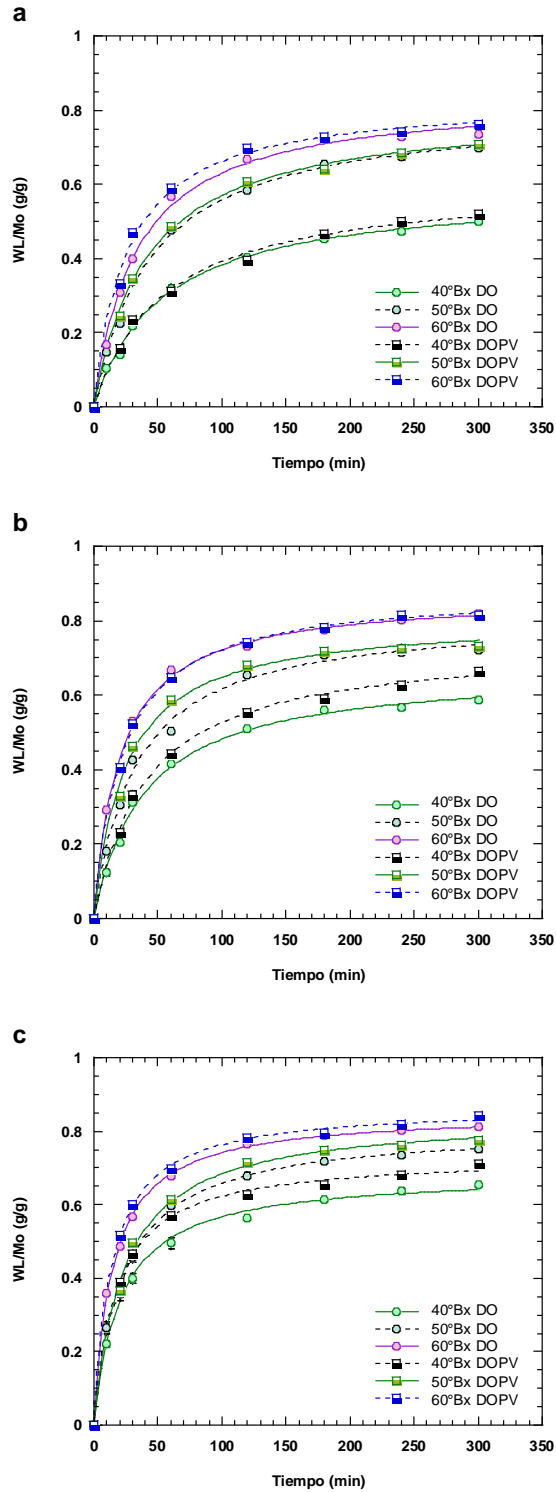


Figura 2-1. Perdida de agua durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa. DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV, deshidratación osmótica con pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. **a** Proceso a 25 °C, **b** proceso a 35 °C y **c** proceso a 45 °C.

También hubo coincidencia con las observaciones documentadas por De Jesus Junqueira *et al.* (2017) berenjena en una solución ternaria a 30 °C y un pulso de vacío de 145 mbar: Estos autores reportaron que el aumento de la WL en las muestras se produjo como consecuencia del mecanismo hidrodinámico y el fenómeno de deformación inducido por la caída de presión provocada, a la vez, por la presión de vacío. La influencia del pulso de vacío en la WL en equilibrio (WL_{∞}) del chayote fue más efectiva con menores concentraciones de solución osmótica (40°Bx), probablemente debido a su menor viscosidad.

Las concentraciones mayores de la solución osmótica aumentaron la SG del chayote, debido al aumento del gradiente osmótico (Figura 2-2). El aumento de la temperatura del medio osmótico también causó aumento de la SG del chayote. Estos resultados corroboran los valores de los parámetros cinéticos s_2 obtenidos por el modelo de Azuara. Esta influencia de la temperatura en los tratamientos osmóticos se demostró en otros estudios y se ha relacionado con el aumento de la permeabilidad de las membranas celulares y reducción de la viscosidad de la solución osmótica y la resistencia externa a la transferencia de masa o solutos (Dermesonlouoglou y Giannakourou, 2018; Ito *et al.*, 2007; Ruiz-López *et al.*, 2011).

El efecto de DOPV en la SG del chayote no generó diferencias en las muestras tratadas con soluciones de sacarosa de 50 y 60 °Bx a 45 °C respecto a DO (Figura 2-2). Shi *et al.* (1995) estudiaron la DO y DOPV de cubos de albaricoque, fresas y piña con solución de sacarosa (65 °Bx) y observaron que la aplicación de un pulso de vacío no incremento SG en comparación con DO. Gomes Corrêa *et al.* (2016) observaron efecto similar del pulso de vacío en la incorporación de sólidos en la DO de tomates con diferentes soluciones osmóticas ternarias. Algo similar observaron Barat *et al.* (2001) con concentración alta de la solución osmótica y/o temperatura alta durante el proceso de DOPV, estas condiciones disminuyeron la SG debido al colapso de la estructura celular, esto, a la vez, promovió expulsión parcial de solución osmótica y liberación de gas interno. Todo esto condujo a la reducción del volumen de poro interno disponible para la impregnación de solutos. Además, Fito (1994) informó que el uso de pulso de vacío es efectivo para aumentar la WL , pero sin influencia en la SG de frutas osmóticamente deshidratadas. Estos resultados revelan que la concentración de la solución osmótica, el tiempo de procesamiento y la temperatura tuvieron mayor influencia que el pulso de vacío en la cinética de rodajas de chayote deshidratadas osmóticamente.

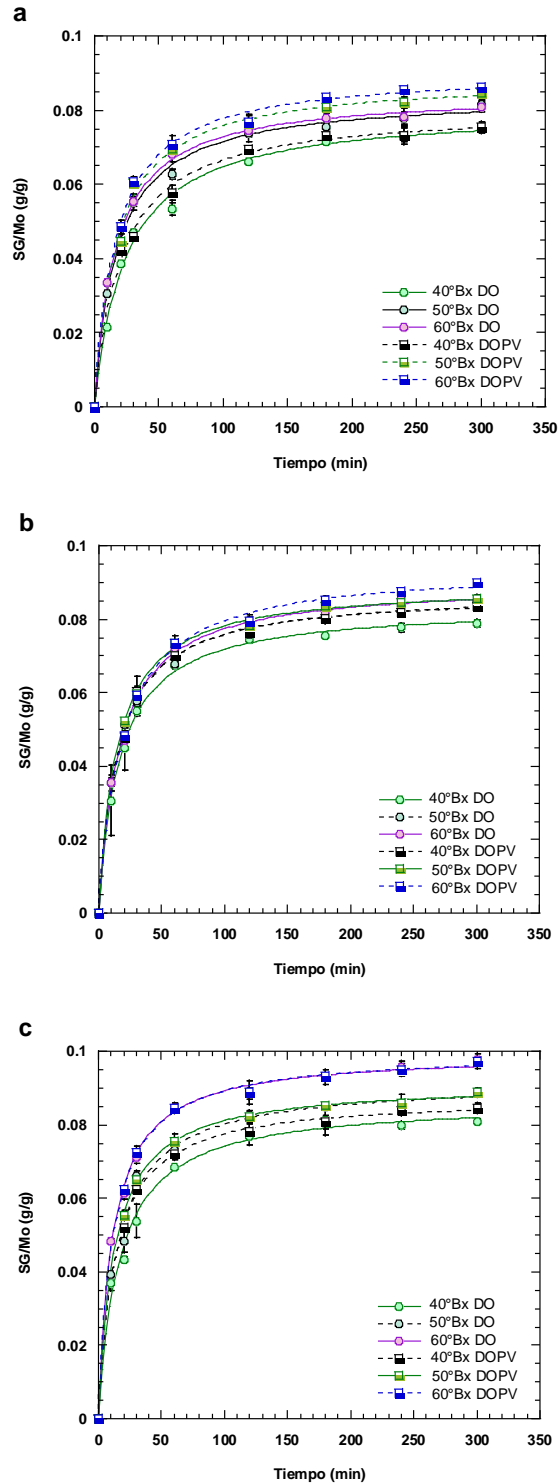


Figura 2-2. Cinéticas de ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa. DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. **a** Proceso a 25 °C, **b** proceso a 35 °C y **c** proceso a 45 °C.

Vieira *et al.* (2012) osmodeshidrataron guayabas en soluciones de sacarosa (40 a 60°Bx) con temperatura entre 20 y 40°C y Viana *et al.* (2014) osmodeshidrataron cladodios de palma forrajera en soluciones de cloruro de sodio (5 a 15°Bx) con temperatura entre 30 y 50 °C; esos autores observaron que la influencia del pulso de vacío fue menor que la concentración y temperatura. Los autores atribuyeron los resultados a las diferencias en la microestructura de cada producto, particularmente a la porosidad del tejido vegetal lo cual determina el nivel de efecto del pulso de vacío.

2.4.2. Difusividad efectiva

Los coeficientes de difusión de agua (D_w) y de sólidos (D_s) para la DO en el tiempo se calcularon con las ecuaciones (5) y (6) (Figuras 2-3 y 2-4, respectivamente). Se distinguió una región con contenido mayor de agua (Figura 2-3) y bajo contenido de SG (Figura 2-4) donde los valores de la difusividad efectiva del agua y los sólidos abundan, respectivamente. Luego, D_w disminuye en forma casi lineal a medida que disminuye el contenido de agua. Mientras, D_s disminuye de forma casi lineal a medida que aumenta la SG.

Los valores promedio del coeficiente de difusión efectiva oscilaron entre 2.36×10^{-10} a $5.25 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y 3.79×10^{-10} a $5.73 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para agua y sólidos, respectivamente. Los valores de los coeficientes de difusión efectiva tuvieron el mismo orden de magnitud y fueron similares a los obtenidos en el tratamiento osmótico de papaya (Rodrigues *et al.*, 2003), guayaba (Corrêa *et al.*, 2010), manzana (Souraki *et al.*, 2014), tomate (Gomes Corrêa *et al.*, 2016), zanahoria, berenjena y remolacha (Junqueira *et al.*, 2020).

De acuerdo con Flores *et al.* (2009), el proceso de difusión durante la DO está regulado por un mecanismo entrópico relacionado con los cambios en las propiedades microestructurales y de transporte en la matriz del alimento e inducidos por los flujos de masa (WL y SG).

Los coeficientes de difusión reflejan la facilidad y/o dificultad con que las moléculas de agua y sacarosa se mueven a través de la matriz vegetal del chayote. Valores promedio de D_w (Figura 2-3) ligeramente inferiores a D_s (Figura 2-4) podrían deberse a la difusión de agua de las células a la solución osmótica vía simplasto (plasmodesmata) y a través de las acuaporinas (canales de proteína) en la bicapa lipídica (Chiralt y Fito, 2003; Castro-Giráldez *et al.*; 2011).

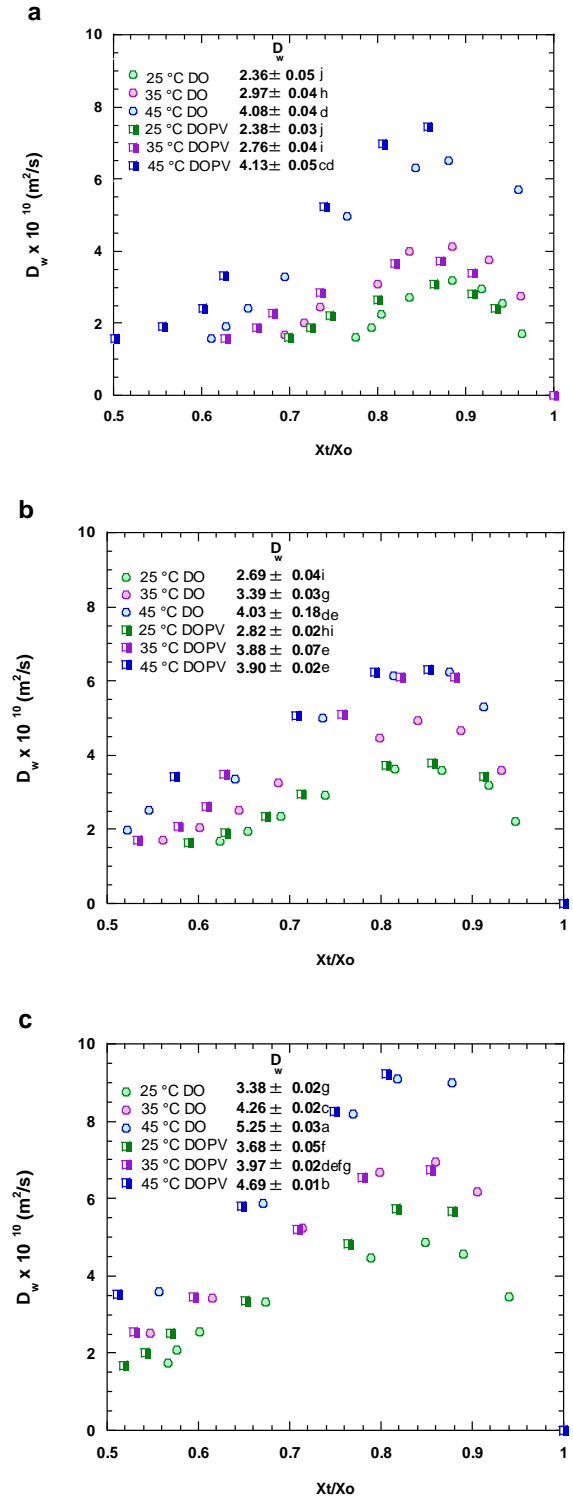


Figura 2-3. Efecto de la temperatura en D_w durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa. DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. **a** Solución de sacarosa a 40 °Bx, **b** solución de sacarosa a 50 °Bx y **c** solución de sacarosa a 60 °Bx. Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

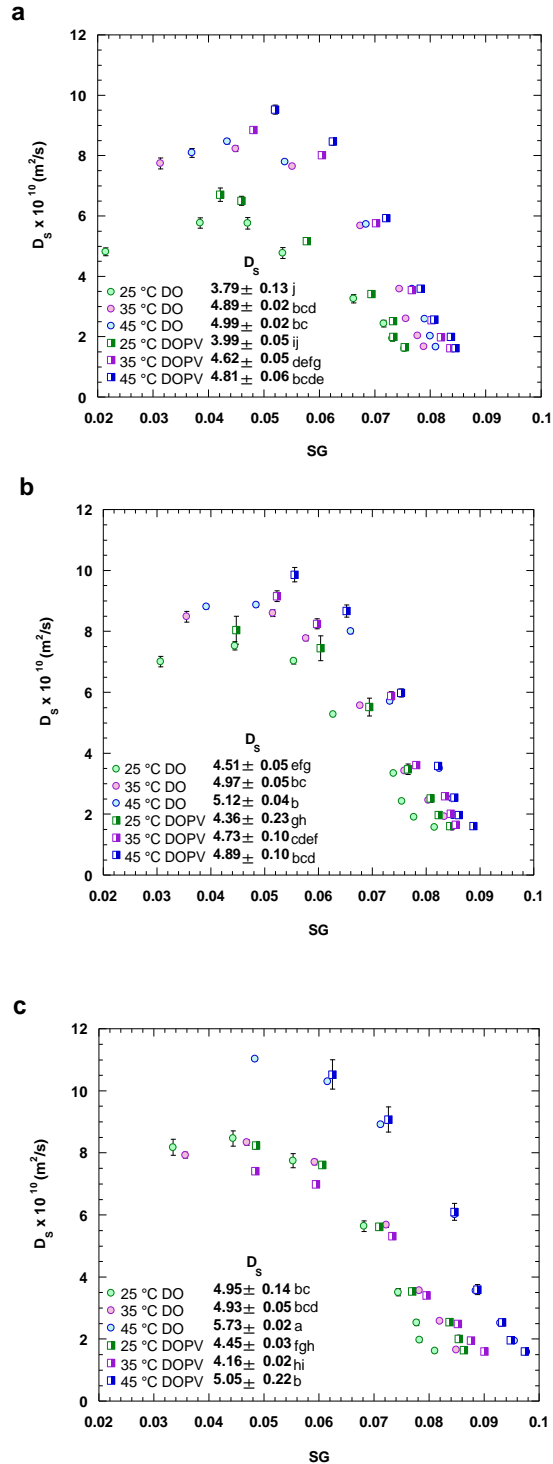


Figura 2-4. Efecto de la temperatura en D_s durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa. DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. **a** Solución de sacarosa a 40 °Bx, **b** solución de sacarosa a 50 °Bx y **c** solución de sacarosa a 60 °Bx. Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Al contrario, la difusión de sacarosa se limita a los espacios extracelulares (transporte apoplástico) y la mayor parte permanece en la superficie del tejido vegetal (Shi y Maguer, 2003). Esto permite la formación de capas compactas de sacarosa sobre el tejido y representa una resistencia externa adicional a la difusión de agua.

D_w aumentó al incrementar la concentración de sacarosa y temperatura de la solución osmótica en DO y DOPV. Assis *et al.* (2016) estudiaron la DO de manzana en soluciones de sacarosa y sorbitol (25 a 65°Bx) a 25, 40 y 60 °C, y Sharma y Dash (2019) osmodeshidrataron jamun negro (*Syzygium cumini*) en solución de sacarosa (60°Bx) en un intervalo de 30 a 50 °C, señalaron que el efecto de la temperatura en D_w puede deberse al aumento de la permeabilidad de la membrana y al hecho de que la temperatura disminuye la viscosidad de la solución osmótica; esto mejora el flujo capilar a través de los poros.

En el presente estudio la DOPV no incrementó la difusión efectiva de agua comparada con la DO. Este resultado coincidió con el documentado por Escriche *et al.* (2000) en kiwi. Estos autores reportaron que con la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de kiwi con solución de sacarosa (65°Bx) y jugo de uva concentrado (63°Bx) D_w no difirió entre DO y DOPV. Esto puede atribuirse a las características estructurales de los frutos estudiados, ya que el efecto de vacío depende de la porosidad del fruto.

Por otro lado, el aumento de la concentración y de temperatura de la solución de sacarosa también incrementó la D_s en la DO y DOPV (Figura 2-4). Sin embargo, para el tratamiento osmótico con soluciones a 40 y 50°Bx las diferencias no fueron significativas al aumentar la temperatura de 35 a 45 °C. Además, con 60°Bx en la solución la diferencia con el incremento de 25 a 35 °C tampoco fue significativa; pero con el aumento a 45 °C los valores de D_s fueron mayores. Lazarides y Mavroudis (1996) estudiaron la DO de papa con solución de jarabe de maíz; ellos observaron que a 45 °C el tejido se dañó, y resultó en aumento drástico en la absorción de solutos. De acuerdo con Chiralt y Fito (2003), la WL provoca la alteración de la membrana celular y cuando esto ocurre con un contenido de agua crítico, los solutos se difunden libremente a todo el tejido, además de los espacios intercelulares abiertos. No obstante, los límites de temperatura se establecen por la tolerancia y la estabilidad térmica de la membrana celular del tejido en estudio (Lazarides 2001).

La DO es un proceso regulado en forma entrópica, en este caso al incrementar la solución osmótica de 25 a 45 °C, las moléculas de agua y de sacarosa incrementan la velocidad y amplitud de su vibración; esto facilita su desplazamiento a través de la matriz vegetal, incluyendo la del chayote. La dependencia de los valores de la difusividad efectiva del agua y la sacarosa con la temperatura se describió mediante una ecuación de tipo Arrhenius (Ecuación (7)). El logaritmo natural de los valores promedio de las difusividades de agua ($\ln D_w$) y sólidos ($\ln D_s$) se graficaron frente a la temperatura absoluta inversa ($1 / T$) para calcular la energía de activación (E_a) (Figuras no mostradas). La E_a es la cantidad de energía mínima que necesita un sistema para poder iniciar un determinado proceso. Los valores de E_a requeridos para iniciar la remoción de agua y la absorción de sólidos en el chayote durante la deshidratación osmótica en condiciones de DO y DOPV, se presentan en la Cuadro 2-2. La E_a para la difusión de agua y sacarosa varió de 9.49 a 21.54 kJ mol⁻¹ y de 3.61 a 10.17 kJ mol⁻¹, respectivamente. Valores elevados de E_a para D_w indican que es necesaria gran cantidad de energía para que el agua fluya desde las células y atravesase las membranas semipermeables hasta la solución osmótica, mientras valores inferiores de E_a para D_s indican que requiere poca energía para difundirse en los espacios extracelulares y adherirse a la superficie de las rodajas de chayote. La energía requerida coincidió con los valores promedio de D_w (Figura 2-3) y fueron ligeramente inferiores a D_s (Figura 2-4). Valores elevados de E_a también indican una alta sensibilidad de D_w a los cambios de temperatura.

La E_a para la difusividad de agua y sólidos durante la DO y DOPV, disminuyó con el aumento de la concentración de las soluciones de sacarosa (Cuadro 2-2). El incremento de la concentración de solutos aumenta la vibración y frecuencia de colisión de las moléculas, por lo que la energía necesaria, para que las moléculas de agua y sacarosa difundan, disminuye. Falade *et al.* (2007) estudiaron la deshidratación osmótica de la sandía usando soluciones de sacarosa; ellos reportaron que a mayor concentración de la solución osmótica menor energía se requiere para la remoción de humedad y la absorción de solutos.

Los valores de E_a para la DOPV fueron iguales o menores que para la DO. Barat *et al.* (2001) mostraron que, en manzana, el valor de E_a era casi el mismo para DO y DOPV y sugirieron que esto puede deberse a que los mecanismos de transferencia de masa involucrados en los cambios de composición de la fase líquida de los alimentos eran los mismos después de la aplicación de vacío.

Cuadro 2-2. Energía de activación requerida para la difusión de agua y sólidos durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote en soluciones de sacarosa.

Proceso	Concentración (°Bx)	Energía de activación (kJ/mol)	
		Difusividad de agua	Difusividad de sólidos
DO	40	21.54 ± 1.14 ^a	10.17 ± 1.02 ^a
	50	17.18 ± 0.48 ^b	5.02 ± 0.58 ^c
	60	17.26 ± 0.16 ^b	5.09 ± 0.39 ^c
DOPV	40	21.54 ± 0.72 ^a	7.41 ± 0.99 ^b
	50	12.83 ± 0.59 ^c	3.61 ± 0.28 ^c
	60	9.49 ± 0.14 ^d	3.96 ± 0.19 ^c

Valores promedio ± desviación estándar (n=3). DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV, deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 10 min. Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Escriche *et al.* (2000) y Panades *et al.* (2008) observaron que el valor mayor de E_a en kiwis y guayaba correspondió a la DO y que esto puede deberse a que el efecto de la temperatura es mayor cuando el proceso se controla por mecanismos pseudo-difusionales, además, que esta es menos influyente donde actúa el HDM. Sin embargo, de acuerdo con Chakraborty y Samanta (2016), procesos con valores inferiores de E_a también podrían indicar un consumo de energía mucho menor en comparación con procesos que presentan valores de E_a elevados.

2.4.3. Actividad de agua

La remoción de agua y la absorción de sólidos en chayote durante los tratamientos osmóticos coincidieron con la disminución de a_w de acuerdo con el modelo empírico DR-Hill (Ecuación (9)). Los valores promedio de R^2 , χ^2 y RMSE obtenidos al ajustar los parámetros del modelo para los datos de a_w durante el tiempo de procesamiento para OD fueron 0.986-0.999, 1.59×10^{-5} - 4.98×10^{-5} y 2.65×10^{-4} - 13.4×10^{-4} respectivamente. Los valores correspondientes de R^2 , χ^2 y RMS para

DOPV fueron 0.982-0.999, 1.39×10^{-5} - 9.09×10^{-5} y 3.18×10^{-4} - 12.7×10^{-4} respectivamente (Cuadro 2-3).

Esos valores altos de R^2 y bajos de χ^2 y RMSE (Cuadro 2-3) sugirieron la idoneidad de la ecuación de DR-Hill para estimar la a_w de rodajas de chayote durante la deshidratación osmótica a concentraciones de solución y temperaturas dadas durante el tiempo de inmersión bajo condiciones DO y DOPV.

El valor inicial de a_w del chayote recién cortado fue 0.981 ± 0.004 , mientras que la a_w de las rodajas de chayote deshidratadas osmóticamente varió de 0.849 ± 0.001 a 0.901 ± 0.001 y 0.846 ± 0.001 a 0.898 ± 0.001 para los tratamientos DO y DOPV, respectivamente.

El pulso de vacío aplicado al inicio del proceso osmótico no modificó significativamente la a_w respecto a la DO. Sin embargo, la disminución de la a_w se aceleró con el aumento de la concentración y la temperatura de la solución de sacarosa. Esto confirmó los efectos interactivos de estas dos variables en la transferencia de masa del chayote. Tendencias similares fueron observadas por De Mello Jr *et al.* (2019) en el tratamiento osmótico de higo verde en solución de sacarosa (40 a 60°Bx) y por Dermesonlouoglou y Giannakourou (2018) en el tratamiento osmótico de albaricoque en soluciones no convencionales (glicerol, eritrol, cloruro de calcio) a 25-45 °C. Estos autores reportaron que la disminución de la a_w en las muestras se produjo como consecuencia del incremento de la concentración y temperatura de la solución osmótica que promovieron la WL y SG en la matriz celular del producto, lo que conduce a un producto más estable. Moraga *et al.* (2011) estudiaron la estabilidad de la toronja osmodeshidratada durante el almacenamiento refrigerado e informaron que los tratamientos osmóticos extienden la vida útil y disminuyen la tasa relativa de reacciones de deterioro de los alimentos.

2.4.4. Sólidos solubles totales

La migración de los azúcares de la solución osmótica a los espacios extracelulares vía plasmodesmos y la adhesión de solutos en la interfase aumentó los sólidos solubles totales (SST) en las rodajas de chayote.

Cuadro 2-3. Parámetros estimados del modelo DR-Hill para la actividad de agua (a_w) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote con diferentes condiciones de tratamiento osmótico.

Proceso	° Bx	Temperatura (°C)	α	θ	η	κ	R^2	χ^2 (x10 ⁻⁵)	RMSE (x10 ⁻⁴)
DO	40	25	0.9876 ± 0.0015	-0.0899 ± 0.0036	1.6715 ± 0.1755	60.219 ± 1.2193	0.9956	2.72	6.37
		35	0.9852 ± 0.0053	-0.1132 ± 0.0129	1.2460 ± 0.2075	78.632 ± 3.3170	0.9983	1.59	4.83
		45	0.9826 ± 0.0007	-0.1098 ± 0.0060	1.2641 ± 0.1057	60.098 ± 5.8492	0.9971	2.28	5.71
	50	25	0.9856 ± 0.0015	-0.0942 ± 0.0026	1.5707 ± 0.0664	62.536 ± 0.3644	0.9975	3.29	6.95
		35	0.9877 ± 0.0049	-0.1623 ± 0.01483	0.8887 ± 0.0909	120.41 ± 13.609	0.9977	2.14	5.62
		45	0.9943 ± 0.0069	-0.2719 ± 0.0169	0.6226 ± 0.0449	306.80 ± 37.819	0.9994	4.98	2.65
	60	25	0.9822 ± 0.0021	-0.0944 ± 0.0032	1.6891 ± 0.1087	58.962 ± 2.0695	0.9951	2.80	6.40
		35	0.9704 ± 0.0018	-0.1187 ± 0.0009	1.1849 ± 0.0174	70.054 ± 2.9766	0.9966	3.78	7.35
		45	1.0318 ± 0.0085	-0.2047 ± 0.0077	0.7055 ± 0.0164	17.206 ± 2.0334	0.9869	2.84	13.4
DOPV	40	25	1.0194 ± 0.0253	-0.1404 ± 0.0357	1.0190 ± 0.2857	45.630 ± 12.118	0.9990	2.04	6.24
		35	0.9721 ± 0.0015	-0.0960 ± 0.0030	1.5032 ± 0.0747	85.125 ± 4.2112	0.9988	7.22	3.68
		45	0.9626 ± 0.0008	-0.0856 ± 0.0029	1.6897 ± 0.0910	71.120 ± 0.9671	0.9975	1.66	5.57
	50	25	1.0054 ± 0.0174	-0.1310 ± 0.0284	1.0897 ± 0.3114	54.186 ± 9.4700	0.9989	2.14	6.35
		35	0.9707 ± 0.0023	-0.1232 ± 0.0051	1.2152 ± 0.0553	99.591 ± 0.8611	0.9989	5.37	3.18
		45	1.0478 ± 0.0074	-0.6580 ± 0.0497	0.3147 ± 0.0201	5510.9 ± 1966.4	0.9994	7.76	11.8
	60	25	0.9855 ± 0.0097	-0.1036 ± 0.0110	1.4624 ± 0.1853	57.670 ± 8.4003	0.9974	1.39	5.07
		35	1.0311 ± 0.0150	-0.2201 ± 0.0228	0.5952 ± 0.0624	46.307 ± 7.4465	0.9962	2.79	7.24
		45	2.5223 ± 0.1695	-1.6986 ± 0.1666	0.5307 ± 0.0387	0.1101 ± 0.0205	0.9823	9.09	12.7

Valores promedio ± desviación estándar (n=3). DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV, deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 10 min.

El modelo empírico Rational Model (Ecuación (10)) se ajustó a los datos experimentales de contenido de SST obtenidos durante la deshidratación osmótica de las rodajas (Cuadro 2-4). El coeficiente de correlación R^2 , χ^2 y RMSE para DO fueron 0.990-0.997, 1.03×10^{-2} - 72.4×10^{-2} y 0.03-0.41 y para DOPV 0.988-0.998, 0.77×10^{-2} - 6.01×10^{-2} y 0.05-0.18. Esto indica que la ecuación del Modelo Rational Model es adecuada y precisa para predecir el contenido de SST del chayote durante los tratamientos de osmodeshidratación en las condiciones estudiadas.

El valor de SST del chayote recién cortado fue de $5.07 \pm 0.43^\circ\text{Bx}$, mientras que al final de los tratamientos osmóticos los valores de SST para DO estuvieron en rango de 10.7 ± 0.10 - $29.96 \pm 0.41^\circ\text{Bx}$ y para DOPV estuvieron en un rango de 12.93 ± 0.40 - $31.90 \pm 0.17^\circ\text{Bx}$. Los SST del chayote incrementaron sustancialmente con el tiempo de tratamiento osmótico. Chaguri *et al.* (2016) quienes osmodeshidrataron plátano verde en soluciones de sorbitol y glicerol (40 - 60°Bx) entre 25 y 45°C , y Schincariol Paes *et al.* (2019) quienes deshidrataron osmóticamente cambuci (*Campomanesia phaea* (O. Berg) Landrum) en soluciones ternarias (40 - 60°Bx) a 25°C ; reportaron que los SST de las muestras incrementaron con el tiempo de tratamiento osmótico derivado de la difusión de solutos y la adhesión de estos sobre la superficie del alimento.

El aumento de temperatura y concentración de la solución osmótica mejoraron la absorción de SST en chayote con DO y DOPV. Estos resultados coinciden con los de Barragán-Iglesias *et al.* (2018); ellos estudiaron el pretratamiento osmótico de papaya en soluciones de hidróxido de calcio y sacarosa e indicaron que el aumento de la temperatura y la concentración de la solución osmótica promueve la transferencia de masa y en consecuencia la ganancia de SST en el tejido vegetal.

Cuadro 2-4. Parámetros estimados del modelo Rational Model para el contenido de sólidos solubles totales (°Bx) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote con diferentes condiciones de tratamiento osmótico.

Proceso	° Bx	Temperatura (°C)	a	b	c	d	R ²	χ ² (x10 ⁻²)	RMSE
DO	40	25	2.4035 ± 0.0808	0.2422 ± 0.0172	0.0225 ± 0.0020	-6.9 e-06 ± 1.6 e-06	0.9973	1.03	0.03
		35	3.9809 ± 0.2859	0.3645 ± 0.0328	0.0263 ± 0.0022	-6.6 e-06 ± 2.4 e-05	0.9964	72.4	0.41
		45	5.2024 ± 0.3084	0.3589 ± 0.0309	0.0185 ± 0.0021	-1.4 e-05 ± 3.0 e-06	0.9935	9.93	0.16
	50	25	3.9015 ± 0.6959	0.6538 ± 0.1572	0.0578 ± 0.0146	-6.2 e-05 ± 1.4 e-05	0.9904	5.21	0.10
		35	3.7778 ± 0.5820	0.7069 ± 0.0764	0.0517 ± 0.0051	-7.4 e-05 ± 4.7 e-06	0.9979	2.34	0.06
		45	6.3483 ± 0.4529	0.3660 ± 0.0511	0.0165 ± 0.0022	-1.6 e-05 ± 5.7 e-07	0.9975	1.52	0.05
	60	25	5.3709 ± 0.6754	0.6273 ± 0.1784	0.0420 ± 0.0147	-3.9 e-05 ± 1.7 e-05	0.9931	5.34	0.10
		35	5.1711 ± 0.1712	0.4817 ± 0.0130	0.0244 ± 0.0013	-3.1 e-05 ± 2.0 e-06	0.9970	6.96	0.14
		45	5.8717 ± 0.2477	0.5639 ± 0.0445	0.0191 ± 0.0016	-1.0 e-05 ± 5.7 e-07	0.9974	5.13	0.11
PV	40	25	-4.3466 ± 2.0390	1.4558 ± 0.1671	0.1421 ± 0.0139	-0.0001 ± 1.0 e-05	0.9896	1.66	0.05
		35	6.5850 ± 0.1248	0.1578 ± 0.0118	0.0086 ± 0.0010	-5.6 e-06 ± 5.7 e-07	0.9886	6.01	0.11
		45	7.5970 ± 0.4441	0.1465 ± 0.0146	0.0039 ± 0.0003	5.5 e-07 ± 2.1 e-07	0.9986	2.28	0.09
	50	25	3.8152 ± 0.3330	0.4023 ± 0.0357	0.0262 ± 0.0026	-1.4 e-05 ± 2.1 e-06	0.9945	1.38	0.05
		35	4.0637 ± 0.9815	0.7933 ± 0.1260	0.0535 ± 0.0090	-7.8 e-05 ± 1.3 e-05	0.9938	4.89	0.12
		45	6.9191 ± 0.4168	0.3301 ± 0.0228	0.0128 ± 0.0009	-1.1 e-05 ± 1.5 e-06	0.9955	3.68	0.13
	60	25	4.2745 ± 0.6074	0.6323 ± 0.0856	0.0383 ± 0.0066	-3.7 e-05 ± 9.7 e-06	0.9923	0.77	0.05
		35	8.4549 ± 0.2052	0.1398 ± 0.0164	0.0023 ± 0.0009	1.6 e-07 ± 3.1 e-07	0.9983	7.49	0.18
		45	3.3688 ± 0.1979	0.8022 ± 0.0312	0.0272 ± 0.0014	1.6 e-05 ± 2.0 e-06	0.9984	2.46	0.09

Valores promedio ± desviación estándar (n=3). DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV, deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 10 min.

2.4.5. Color

La disminución de a_w e incorporación de sólidos solubles en rodajas de chayote durante los tratamientos osmóticos también modificó las propiedades superficiales de la matriz vegetal para reflejar la luz visible. El mesocarpio del chayote contiene clorofilas (Cadena Iñiguez *et al.*, 2011) y carotenoides (Loizzo *et al.*, 2016) que confieren el color amarillo crema a verde pálido de la pulpa fresca (Figura 2-5 a). Los valores del fruto fresco fueron luminosidad 74.04 ± 0.43 , Croma 10.50 ± 0.45 y Hue 82.29 ± 1.21 .

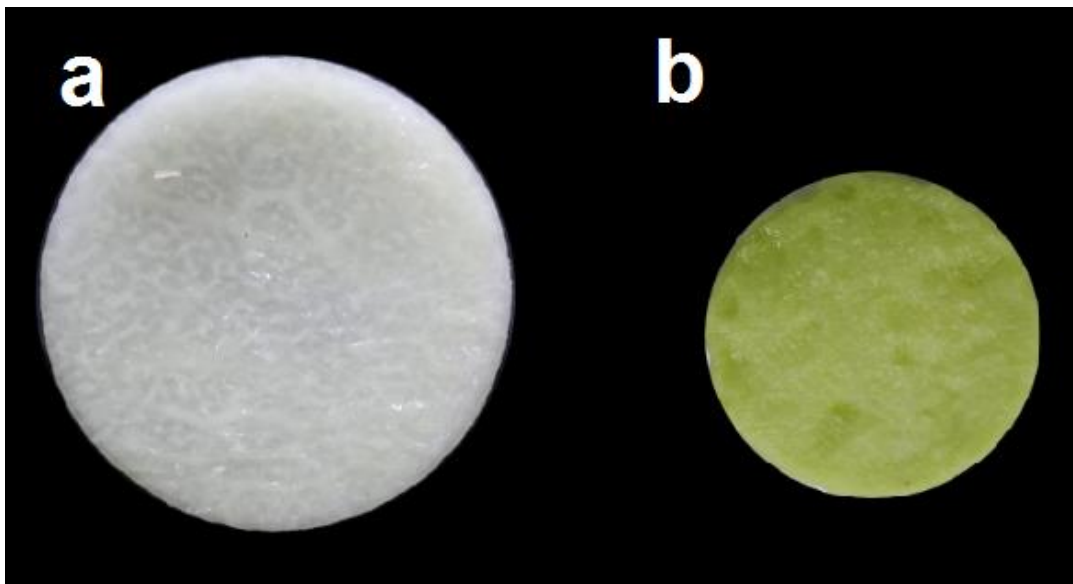


Figura 2-5. Cambios en el color de rodajas de chayote durante la deshidratación osmótica presión atmosférica con solución de sacarosa a 50 °Bx a 35°C. a chayote fresco, b chayote osmodeshidratado por 300 min.

El producto osmodeshidratado disminuyó la luminosidad (L^*) en las muestras DOPV en comparación con las muestras frescas (Figura 2-6 a). El cambio está asociado a la transparencia debido a la sustitución total o parcial del gas presente en los poros por la solución osmótica mediante un mecanismo hidrodinámico. El efecto de la aplicación de pulsos al vacío también se observó en otros tejidos hortofrutícolas osmodeshidratados, como peras (Moreno *et al.*, 2011), fresas (Moreno *et al.*, 2012), berenjenas (De Jesus Junqueira *et al.*, 2017), remolachas y zanahorias (De Jesus Junqueira *et al.*, 2018).

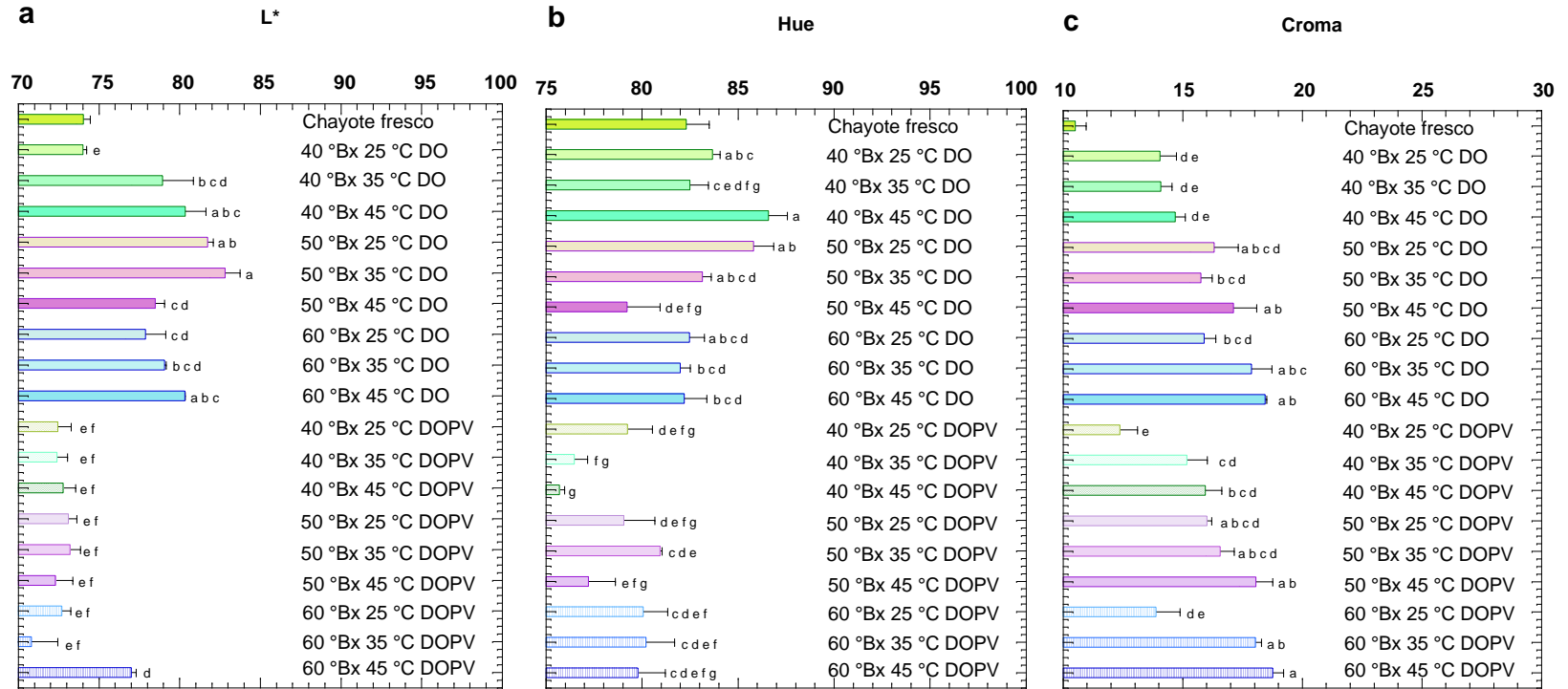


Figura 2-5. Color de rodajas de chayote osmodeshidratado por 300 min sin modificar la presión atmosférica (DO) y con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min (DOPV). Valores promedio \pm desviación estándar (n=3). Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Sin embargo, se observó aumento de L^* hasta 11.85 % en las muestras tratadas con OD (Figura 2-6a). De acuerdo con Vieira *et al.* (2012), esto puede atribuirse a la impregnación de azúcar en la superficie de la fruta.

También, se observaron diferencias menores en los valores de Hue entre las muestras tratadas osmóticamente y las frescas (Figura 2-6 b). En general, el color expresado como ángulo de tonalidad (Hue) oscilaba de 79.22 ± 1.70 a 86.57 ± 0.99 y 75.69 ± 0.27 a 80.94 ± 0.11 para DO y DOPV, respectivamente. Estos valores de matiz corresponden al amarillo crema (matiz ≤ 90).

Los cambios en color verde y amarillo en chayote se pueden evaluar mediante croma. Se observó aumento significativo en los valores de croma en las muestras osmodeshidratadas en comparación con las frescas (Figura 2-6 c). Rodrigues *et al.* (2003) también observaron comportamiento similar para papayas tratadas osmóticamente.

Cuando el valor de croma mayor representa color más puro e intenso como se observa en la Figura 2-5 b, y este cambio juega un papel clave en la calidad total de las rodajas de chayote osmodeshidratado. El aumento de verdor y amarilleo es claro y parece ser resultado de la WL, absorción de sacarosa y concentración y / o retención de pigmentos (clorofilas y carotenoides) en la matriz vegetal.

2.4.6. Cambios de volumen durante la deshidratación osmótica

Cuando un tejido vegetal como el chayote se deshidrata en solución osmótica, los fenómenos de transferencia de masa, como WL y SG modifican las propiedades fisicoquímicas y estructura del tejido. Esos cambios incluyen movilidad y distribución del agua, contracción del volumen, color y propiedades mecánicas, entre otros. Al respecto, Azuara *et al.* (2002), Flores *et al.* (2009) y Seguí *et al.* (2012) mencionan que durante la DO las células experimentan tres fases de deshidratación en función de la pérdida de volumen celular. De tal forma que se puede representar el cambio de las células parenquimatosas del mesocarpio del chayote durante la DO, desde el inicio del tratamiento hasta la plasmólisis completa graficando la contracción volumétrica de las rodajas de chayote (V_t / V_o) vs el contenido de humedad (X_t / X_o) (Figura 2-7).

En la etapa 1, la diferencia de potencial químico entre las células y la solución osmótica da lugar a un flujo de agua celular fuera del protoplasto. El protoplasto y la pared celular que están enlazados por sitios de unión se encogen y deforman juntos hasta que las fuerzas de estiramiento de la membrana alcanzan su límite y se desprende de la pared celular en los extremos, sin embargo, mantienen contacto en otras regiones (plasmólisis incipiente). Estos cambios causan reducción del volumen de las rodajas de chayote, mientras que la disminución del contenido de humedad se debe a *WL* y *SG*.

La etapa 2 se caracteriza por la contracción del protoplasma y la vacuola debido a la *WL* a través de la membrana plasmática, lo que aumenta las fuerzas impulsoras de estiramiento entre la membrana y pared celular, hasta que la membrana se desprende completamente y se contrae elásticamente (plasmólisis). Como consecuencia, se produce aumento de la porosidad a medida que se crean nuevos espacios intracelulares que serán ocupados por la solución osmótica; compensando directamente la pérdida de volumen y disminuye el contenido de agua. Debido a esto, la contracción volumétrica en la etapa 2 es menor que la que ocurre en la etapa 1.

En la Etapa 3, la estructura celular comienza a colapsar, no obstante, la pared celular continúa unida al protoplasto por estructuras elásticas llamadas hebras hechtianas. Ambos componentes celulares continúan actuando como barreras físicas para la transferencia de masa. En esta etapa, hay una ligera contracción volumétrica en las rodajas de chayote, pero la absorción de solutos provoca una disminución adicional en el contenido de humedad.

En cuanto al uso de un pulso de vacío al inicio del proceso osmótico (DOPV), se puede mostrar el desplazamiento de las etapas a menores contenidos de agua (Figura 2-7 d, e y f). Esto se puede explicar por la entrada de un flujo hidrodinámico de solución osmótica en el espacio intracelular debido a un HDM.

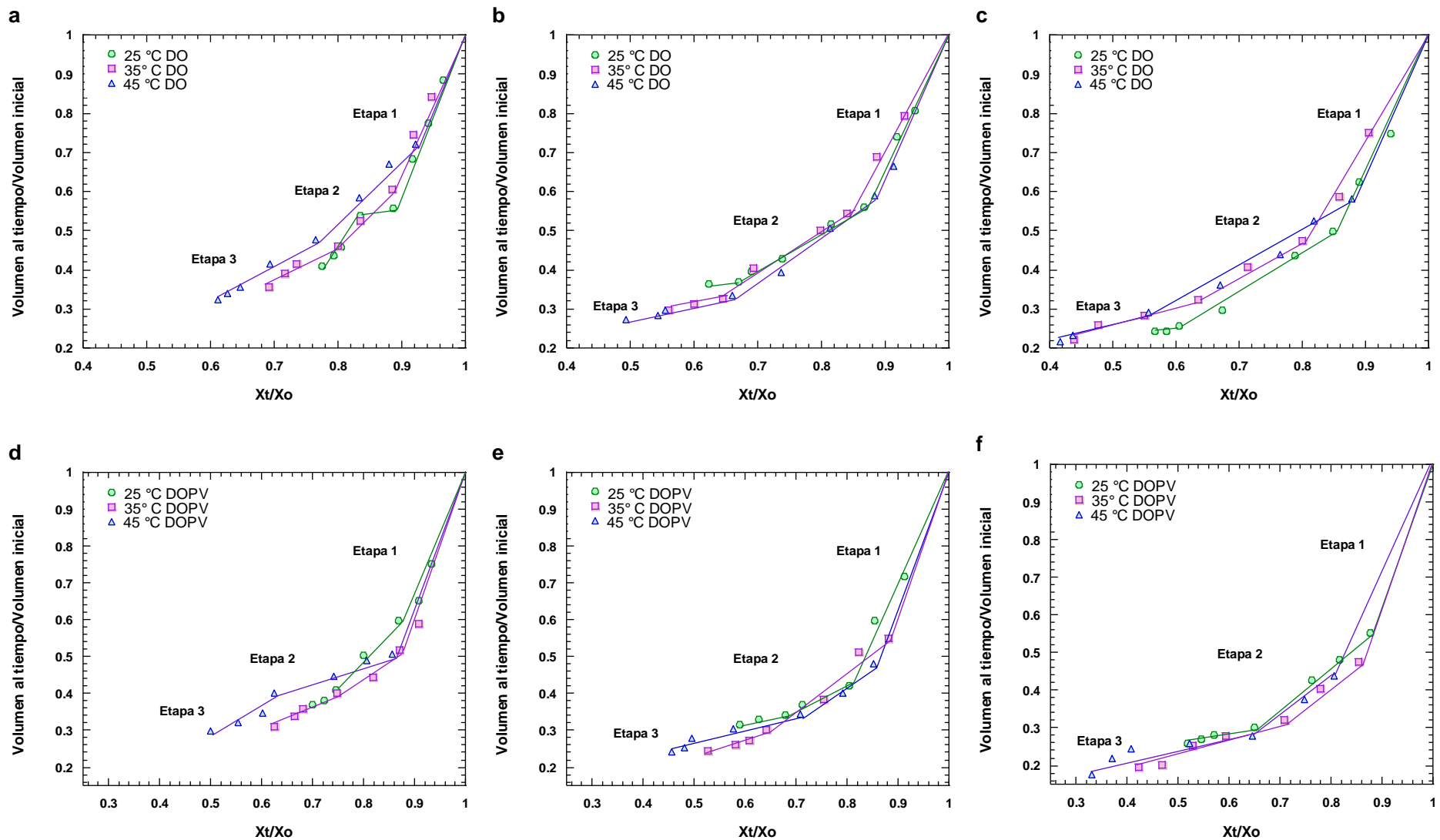


Figura 2-7. Cambios en el volumen y contenido de agua en rodajas de chayote osmodeshidratadas. DO, sin modificar la presión atmosférica. DOPV deshidratación osmótica con un pulso de vacío de 115 mbar por 15 min. **a** Solución de sacarosa a 40 °Bx DO, **b** solución de sacarosa a 50 °Bx DO, **c** solución de sacarosa a 60 °Bx DO, **d** solución de sacarosa a 40 °Bx DOPV, **e** solución de sacarosa a 50 °Bx DOPV, y **f** solución de sacarosa a 60 °Bx DOPV.

2.5. CONCLUSIONES

Para las condiciones de proceso estudiadas, la concentración de la solución osmótica, temperatura y tiempo de procesamiento tuvieron mayor influencia que la aplicación de pulso de vacío (DOPV) en las cinéticas de transferencia de masa de las rodajas de chayote deshidratadas osmóticamente en soluciones de sacarosa. La influencia de la temperatura en la difusividad efectiva presentó dependencia de tipo Arrhenius y la E_a mostró requerimientos de energía similares para DO y DOPV, y requerimientos de energía bajos para altas concentraciones de solución osmótica. Las rodajas de chayote osmodeshidratado presenta menor a_w (hasta 0.846), mayor contenido SST (hasta 31.9°Bx) y color más puro e intenso. La contracción volumétrica de las muestras permitió representar tres fases de deshidratación que experimentan las células parenquimatosas del mesocarpio durante la DO.

Los valores altos de R^2 y bajos tanto de χ^2 como de RMSE representaron la idoneidad de los modelos empíricos DR-Hill y Rational Model para predecir la a_w y el contenido de SST de rodajas de chayote osmodeshidratado en las condiciones estudiadas. Estos resultados podrían ser útiles en el diseño y optimización de un método de DO para chayote en función de las características sensoriales y fisicoquímicas que se deseen en el producto final.

Los presentes hallazgos sugieren que la DO permite la obtención de rodajas de chayote mínimamente procesado que podría ser incluido en productos de cocción rápida, tales como ensaladas o mezclas de sopas.

2.6. LITERATURA CITADA

Abraão A. S., A. M. Lemos, A. Vilela, J. M. Sousa and F. M. Nunes (2013) Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. *Food and Bioprocess Technology* 91:481-494, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.04.006>.

Aguñiga- Sánchez I., M. Soto-Hernández, J. Cadena- Iñiguez, L. Ruíz-Posadas, J. D. Cadena-Zamudio, A. K. González-Ugarte, B. Weiss-Steider and E. Santiago-Osorio (2015) Fruit Extract from A *Sechium edule* Hybrid Induce Apoptosis in Leukaemic Cell

Lines but not in Normal Cells. *Nutrition and Cancer* 67:250-257, <https://doi.org/10.1080/01635581.2015.989370>.

Assis F. R., R. M. S. C. Morais and A. M. M. B. Morais (2016) Mathematical modelling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes. *Journal of Food Processing and Preservation* 41:e12895, <https://doi.org/10.1111/jfpp.12895>.

Avendaño Arrazate C. H., J. Cadena-Iñiguez, M. L. Arévalo Galarza, E. Campos Rojas, V. M. Cisneros Solano and J. F. Aguirre Medina (2011) Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. 1st ed., pp92. Colegio de Postgraduados. Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México A. C. México, DF.

Azuara E., C. I. Beristain and G. F. Gutiérrez (2002) Osmotic dehydration of apples by immersion in concentrated sucrose / maltodextrin solutions. *Journal of Food Processing Preservation* 26:295–306, <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2002.tb00486.x>.

Azuara E., R. Cortes, H. S. García and C. I. Beristain (1992) Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology* 4:409–418, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb01206.x>.

Barat J. M., A. Chiralt and P. Fito (2001) Effect of osmotic solution concentration, temperature and vacuum impregnation pretreatment on osmotic dehydration kinetics of apple slices. *Food Science and Technology International* 5:451-456, <https://doi.org/10.1106/4L77-UPTY-KEAQ-3TIV>.

Barragán-Iglesias J., J. Rodríguez-Ramírez, S. S. Sablani and L. L. Méndez-Lagunas (2018) Texture analysis of dried papaya (*Carica papaya* L., cv. Maradol) pretreated with calcium and osmotic dehydration. *Drying Technology* 73:906-919, <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1473420>.

Batista de Medeiros R. A., E. V. da Silva Júnior, J. H. Fernandes da Silva, O. da Cunha Ferreira Neto, S. C. Rupert Brandão, Z. M. Pimenta Barros, O. R. Sá da Rocha and P. Moreira Azoubel (2019) Effect of different grape residues polyphenols impregnation

- techniques in mango. *Journal of Food Engineering* 262:1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.011>.
- Beristain C.I., E. Azuara, R. Cortés and H. S. García (1990)** Mass transfer during the osmotic dehydration of pineapple rings. *International Journal of Food Science and Technology* 25:576–582, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01117.x>.
- Cadena-Iñiguez J., L. M. Arévalo-Galarza, L. M. Ruiz-Posadas, J. F. Aguirre-Medina, M. Soto-Hernández, M. Luna-Cavazos and H. A. Zavaleta-Mancera (2007)** Quality evaluation and influence of 1-MCP on *Sechium edule* (Jacq.) Sw. fruit during postharvest. *Postharvest Biology and Technology* 40:170-176, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.12.013>.
- Cadena-Iñiguez J., M. Soto-Hernández, L. Arévalo-Galarza, L. M. Ruiz-Posadas, C. H. Avendaño-Arrazate, E. Santiago-Osorio, M. Acosta-Ramos, J. F. Aguirre-Medina, V. M. Cisneros-Solano and D. Ochoa-Martínez (2007)** Production, genetics, postharvest management and pharmacological characteristics of *Sechium edule* (Jacq.) Sw. *Fresh Produce* 1:41-53.
- Cadena-Iñiguez J., M. Soto-Hernández, M. L. Arévalo-Galarza, C. H. Avendaño-Arrazate, J. F. Aguirre-Medina y L. M. Ruiz-Posadas (2011)** Caracterización bioquímica de variedades domesticadas de chayote *Sechium edule* (Jacq.) Sw. comparadas con parientes silvestres. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 2:45-55.
- Castro-Giráldez M., P. J. Fito and P. Fito (2011)** Nonlinear thermodynamic approach to analyze long time osmotic dehydration of parenchymatic apple tissue. *Journal of Food Engineering* 102:34–42, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.07.032>.
- Chaguri L., M. S. Sanchez, V. P. Flammia and C. C. Tadini (2016)** Green banana (*Musa cavendishii*) osmotic dehydration by non-caloric solutions: modeling, physical-chemical properties, color, and texture. *Food and Bioprocess Technology* 10:615-629, <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1839-2>.

- Chakraborty R. and R. Samanta (2016)** Concurrent osmotic dehydration and vacuum drying of kiwi fruit (*Actinidia deliciosa* cv. Hayward) under far infrared radiation: process optimization, kinetics and quality assessment. *Journal of Food Process Engineering* 40:e12391, <https://doi.org/10.1111/jfpe.12391>.
- Chiralt A. and P. Fito (2003)** Transport Mechanisms in Osmotic Dehydration: The Role of the Structure. *Food Science and Technology International* 9:179-186, <https://doi.org/10.1177/108201303034757>.
- Corrêa J. L. G., D. B. Ernesto, J. G. L. F. Alves and R. S. Andrade (2014)** Optimization of vacuum pulse osmotic dehydration of blanched pumpkin. *International Journal of Food Science and Technology* 49:2008-2014, <https://doi.org/10.1111/ijfs.12502>.
- Corrêa J. L. G., L. M. Pereira, G. S. Vieira and M. D. Hubinger (2010)** Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *Journal of Food Engineering* 96:498–504, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.032>.
- De Jesus Junqueira J. R., J. L. G. Gomes Corrêa, K. Soares de Mendonça, R. E. De Mello Júnior and A. Umbelina de Souza (2018)** Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: Effect of vacuum pressure on the quality parameters. *Food and Bioprocess Technology* 11:1863-1875, <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2147-9>.
- De Jesus Junqueira J. R., J. L. G. Gomes Corrêa, K. Soares de Mendonça, R. E. De Mello Júnior and A. Umbelina de Souza (2018)** Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: Effect of vacuum pressure on the quality parameters. *Food and Bioprocess Technology* 11:1863-1875, <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2147-9>.
- De Jesus Junqueira J. R., J. L. Gomes Corrêa, K. Soares de Mendonça, N. Silva Resende and E. V. De Barros Vilas Boas (2017)** Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 41:10-18, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.01.006>.

- De Mello Júnior R. E., J. L. G. Gomes Corrêa, F. José Lopes, A. Umbelina de Souza and K. C. Ribeiro da Silva (2019)** Kinetics of the pulsed vacuum osmotic dehydration of green fig (*Ficus carica L.*). *Heat and Mass Transfer* 55:1685-1691, <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02559-w>.
- Dermesonlouoglou E. K. and M. C. Giannakourou (2018)** Modelling dehydration of apricot in a non-conventional multi-component osmotic solution: effect on mass transfer kinetics and quality characteristics. *Journal of Food Science and Technology* 55:4079-4089, <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3334-4>.
- Derossi A., C. Severini, A. Del Mastro and T. De Pilli (2015)** Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach. *LWT - Food Science and Technology* 60:641-648, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.056>.
- Escriche I., R. Garcia-Pinchi, A. Andrés and P. Fito (2000)** Osmotic dehydration of kiwifruit (*actznidza chinensis*): Fluxes and mass transfer kinetics. *Journal of Food Process Engineering* 23:191-205, <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2000.tb00511.x>.
- Falade K. O., J. C. Igbeka and F. A. Ayanwuyi (2007)** Kinetics of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering* 80:979-985, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.033>.
- Firdous S. M., S. Ahmed and S. Dey (2012)** Antiepileptic and central nervous system depressant activity of *Sechium edule* fruit extract. *Bangladesh Journal of Pharmacology* 7: 199-202, <https://doi.org/10.3329/bjp.v7i3.11275>.
- Fito P. (1994)** Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. *Journal of Food Engineering* 22:313-328, [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90037-X).
- Flores-Andrade E., C. I. Beristain, E. J. Vernon-Carter, G. F. Gutiérrez and E. Azuara (2009)** Enthalpy-entropy compensation and water transfer mechanism in osmotically dehydrated agar gel. *Drying Technology: An International Journal* 27:999-1009, <https://doi.org/10.1080/07373930902904921>.

- Frías Tamayo J. A., G. Ramírez Peña, C. Paz Lorente, C. Herrero Pacheco y J. Acosta Campusano (2016)** *Sechium edule* (jacq) sw: Potencia fitoterapéutica como agente antibacteriano. *Medisur* 14:6.
- Gomes Corrêa J. L., D. B. Ernesto and K. Soares de Mendonça (2016)** Pulsed vacuum osmotic dehydration of tomatoes: Sodium incorporation reduction and kinetics modeling. *LWT - Food Science and Technology* 71:17-24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.046>.
- Ito A. P., R. Valeriano Tonn, K. Jin Park and M. Dupas Hubinger (2007)** Influence of Process Conditions on the Mass Transfer Kinetics of Pulsed Vacuum Osmotically Dehydrated Mango Slices. *Drying Technology: An International Journal* 25:1769-1777, <http://dx.doi.org/10.1080/07373930701593263>.
- Junqueira J. R. J., J. L. G. Corrêa, K. S. Mendonca, R. E. Mello Junior and A. U. Souza (2020)** Modeling mass transfer during osmotic dehydration of different vegetable structures under vacuum conditions. *Food Science and Technology*, <https://doi.org/10.1590/fst.02420>.
- Lazarides H. N. and N. E. Mavroudis (1996)** Kinetics of osmotic dehydration of a highly shrinking vegetable tissue in a salt-free medium. *Journal of Food Engineering* 30:61-74, [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(96\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(96)00042-8).
- Loizzo M. R., M. Bonesi, F. Menichini, M. C. Tenuta, M. Leporini and R. Tundis (2016)** Antioxidant and carbohydrate-hydrolysing enzymes potential of *Sechium edule* (Jacq.) Swartz (Cucurbitaceae) peel, leaves and pulp fresh and processed. *Plant Foods for Human Nutrition* 71:381-387, <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0571-4>.
- Lombard G. E., J. C. Oloveira, P. Fito and A. Andrés (2008)** Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering* 85:277–284, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.009>.
- Miranda Pinheiro R. M., W. P. da Silva, D. S. do A. Miranda, C. M. D. P. S. e Silva, T. Pessoa and M. S. de Medeiros (2017)** Description of osmotic dehydration of melon cubes using

- a three dimensional diffusion model: An algorithm to determine the effective diffusivity. *International Journal of Food Engineering* 13(12), <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0241>.
- Moraga M. J., G. Moraga and N. Martínez-Navarrete (2011)** Effect of the re-use of the osmotic solution on the stability of osmodehydro-refrigerated grapefruit. *LWT - Food Science and Technology* 44:35-41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2010.05.018>.
- Moreno J., M. Gonzales, P. Zúñiga, G. Petzild, K. Mella and O. Muñoz (2016)** Ohmic heating and pulsed vacuum effect on dehydration processes and polyphenol component retention of osmodehydrated blueberries (cv. Tifblue). *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 36:112-119, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.005>.
- Moreno J., R. Simpson, M. Sayas, I. Segura, O. Aldana and S. Almonacid (2011)** Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. *Packham's Triumph*). *Journal of Food Engineering* 104:621–627, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.029>.
- Moreno J., R. Simpson, N. Pizarro, K. Parada, N. Pinilla, J. E. Reyes and S. Almonacid (2012)** Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the quality and microbial stability of osmotically dehydrated strawberries (cv. *Camarosa*). *Journal of Food Engineering* 110:310–316, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.005>.
- Ordoñez A., J. Gomez, M. Vattuone and M. Isla (2006)** Antioxidant activities of *Sechium edule* (Jacq.) Swartz extracts. *Food Chemistry* 97:452-458, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.024>.
- Panades G., D. Castro, A. Chiralt, P. Fito, M. Nuñez and R. Jimenez (2008)** Mass transfer mechanisms occurring in osmotic dehydration of guava. *Journal of Food Engineering* 87:386–390, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.021>.
- Rodrigues A. C. C., R. L. Cunha and M. D. Hubinger (2003)**. Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. *Journal of Food Engineering* 59:129-135, [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00442-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00442-9).

- Ruiz-López I. I., H. Ruiz-Espinosa, E. Herman-Lara and G. Zárate-Castillo (2011)** Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (*Averna carambola* L.) in sugar solutions. *Journal of Food Engineering* 104:218–226, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.013>.
- Ruiz-López I. I., I. R. Huerta-Mora, M. A. Vivar-Vera, C. E. Martínez-Sánchez and E. Herman-Lara (2010)** Effect of osmotic dehydration on air-drying characteristics of chayote. *Drying Technology: An International Journal* 28:1201–1212, <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2010.482716>.
- Schincariol Paes M., J. P. Ferreira Del Pintor, P. de Alcântara Pessoa Filho and C. C. Tadini (2019)** Mass transfer modeling during osmotic dehydration of cambuci (*Campomanesia phaea* (O. Berg) Landrum) slices and quality assessment. *Journal of Molecular Liquids* 273:408–413, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.040>.
- Seguí L., P. J. Fito and P. Fito (2012)** Understanding osmotic dehydration of tissue structured foods by means of a cellular approach. *Journal of Food Engineering* 110:240–247, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.012>.
- Shafirany M. Z., Y. Susilawati, A. Muhtadi, T. Milanda and A. Y. Chaerunissa (2018)** Antihypertensive activities instant granul of combination extract roselle flower petals (*Hibiscus sabdariffa*L.), chayote fruit (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) and aloe vera leaves (*Aloe Vera* L.) in white male rats. *Research Journal of Chemistry and Enviroment* 22:58–65.
- Sharma M. and K. K. Dash (2019)** Effect of ultrasonic vacuum pretreatment on mass transfer kinetics during osmotic dehydration of black jamun fruit. *Ultrasonics - Sonochemistry* 58:104693, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104693>.
- Shi J. and M. L. Maguer (2003)** Mass transfer in cellular material at solid–liquid contacting interface. *LWT-Food Science and Technology* 36:3–11, [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(02\)00219-0](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(02)00219-0).

- Shi X. Q., P. Fito and A. Chiralt (1995)** Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *Food Research International* 28:445-454, [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(96\)81391-3](https://doi.org/10.1016/0963-9969(96)81391-3).
- Souraki B. A., A. Ghaffari and Y. Bayat (2012)** Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution. *Food and bioproducts processing* 90:64-71, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2010.11.015>.
- Souraki B. A., M. Ghavami and H. Tondro (2014)** Correction of moisture and sucrose effective diffusivities for shrinkage during osmotic dehydration of apple in sucrose solution. *Food and bioproducts processing* 92:1-8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2013.07.002>.
- Torres J. D., P. Talens, J. M. Carot, A. Chiralt and I. Escriche (2007)** Volatile profile of mango (*Mangifera indica* L.), as affected by osmotic dehydration. *Food Chemistry* 101:219-228, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.020>.
- Viana A. D., J. L. G. Corrêa and A. Justus (2014)** Optimisation of the pulsed vacuum osmotic dehydration of cladodes of fodder palm. *International Journal of Food Science and Technology* 49:726-732, <http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.12357>.
- Vieira E. F., O. Pinho, I. M. P. L. V. O. Ferreira and C. Deleure-Matos (2019)** Chayote (*Sechium edule*): A review of nutritional composition, bioactivities and potential applications. *Food Chemistry* 275:557-568, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.146>.
- Vieira G. S., L. M. Pereira and M. D. Hubinger (2011)** Optimisation of osmotic dehydration process of guavas by response surface methodology and desirability function. *International Journal of Food Science and Technology* 47:132-140, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02818.x>.

CAPÍTULO III

DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA EN RODAJAS DE CHAYOTE (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) CON IMPREGNACIÓN DE OLEORRESINA DE PIMIENTA NEGRA

3.1. RESUMEN

El objetivo de este estudio fue utilizar el proceso de deshidratación osmótica (DO) para impregnar rodajas de chayote con emulsiones de oleorresina de pimienta negra. La hipótesis: las variables asociadas a la composición de la emulsión y proceso afectan la propiedades fisicoquímicas y retención de piperina en rodajas de chayote. Los factores evaluados fueron el biopolímero emulsificante, cantidad de alcohol, tiempo de inmersión y temperatura en la pérdida de agua (*WFL*), ganancia de sólidos (*SG*), difusividad aparente del agua, actividad del agua (a_w), color y retención de piperina durante la DO de rodajas de chayote. La cinética de *WFL*, *SG* y a_w se obtuvieron con solución acuosa con sacarosa al 43 % con emulsión. Las temperaturas de 35 y 45 °C combinadas con 420 min de inmersión aumentaron las tasas de *WFL* y *SG* y reducción de a_w de las rodajas de chayote. La piperina se impregno hasta 3616.1 ± 179.59 y 5410.6 ± 88.28 mg piperina 100 g^{-1} ss cuando se utilizó concentrado de proteína de suero y goma arábica como emulsificante. La microscopía electrónica de barrido (SEM) mostró que la piperina encapsulada se impregna en el tejido vegetal, lo que demuestra que se pueden usar emulsiones aceite en agua para impregnar ingredientes funcionales oleosos.

Palabras clave: compuestos bioactivos, alimentos funcionales, emulsiones con etanol, coeficientes de difusión, actividad de agua, color.

3.2 INTRODUCCIÓN

El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz) es una especie de la familia Cucurbitaceae, originaria y domesticada en México (González-Santos *et al.*, 2016). Los principales países productores de chayote son: México, Costa Rica, Brasil y República Dominicana (Lim 2012). Según el informe más reciente, México es el primer productor y exportador del mundo con cerca de 2661.84 t (SIAP 2016), con Estados Unidos y Canadá como principales destinos.

Los chayotes de la variedad *virens levis* tienen sabor suave y neutro, y se consumen hervidos, horneados, fritos o crudos en ensaladas (Avendaño Arrazate *et al.*, 2011). La fruta es fuente de:

potasio, calcio, fósforo y magnesio; además contiene vitaminas C, E y ácido fólico (Vieira *et al.*, 2019). Adicionalmente, presenta actividad diurética (Loizzo *et al.*, 2016), antioxidante (Díaz-de-Cerio *et al.*, 2019), antibacteriana (Frías Tamayo *et al.*, 2016), antihipertensiva (Shafirany *et al.*, 2016), antiepiléptica (Firdous *et al.*, 2012) y anticancerígena (Aguñiga-Sánchez *et al.*, 2015).

Sin embargo, a pesar de que la demanda del fruto fresco se ha incrementado en los últimos años, el almacenamiento y exportación a mercados distantes se ve limitada debido a que el embrión tiene germinación prematura dentro del fruto durante madurez hortícola, lo que acelera su deterioro y reduce su calidad y valor comercial (Cadena-Íñiguez *et al.*, 2006). Además, su contenido de agua, de alrededor de 95 kg 100 kg⁻¹ en base fresco puede provocar pérdidas postcosecha por deterioro microbiano, manipulación, distribución y almacenamiento inadecuados. Por lo tanto, el chayote requiere técnicas que mejoren su estabilidad y aumenten la vida útil mediante la eliminación de agua. En este sentido, la deshidratación osmótica (DO) ha permitido la formulación de albaricoque (Dermesonlouoglou y Giannakourou, 2018), banano (Chaguri *et al.*, 2016), higo verde (De Mello Júnior *et al.*, 2019) manzana (Assis *et al.*, 2016), remolacha y zanahoria (Junqueira *et al.*, 2020) con un contenido de humedad intermedio (hasta 50%) y actividad de agua reducida (a_w). Así, la DO podría ser útil para producir chayote parcialmente deshidratado con potencial aplicación como ingrediente o producto mínimamente procesado con mayor comerciabilidad.

La DO implica la inmersión de un alimento en soluciones acuosas de alta presión osmótica que simultáneamente inducen la difusión de agua del producto a la solución y difusión del soluto de la solución al alimento (Assis *et al.*, 2016; Dermesonlougrou y Giannakourou, 2018). Varias variables están asociadas al proceso como la composición química y concentración de la solución hipertónica, temperatura, tiempo de inmersión y presión; además, las características del material biológico como especie, variedad, madurez, microestructura, porosidad, turgencia y forma geométrica de la muestra (Giraldo *et al.*, 2003; Gomes Corrêa *et al.*, 2016; Miranda Pinheiro *et al.*, 2017; Ruiz-López *et al.*, 2011; Vieira *et al.*, 2011).

Una de las ventajas de la DO es que permite la impregnación de ingredientes funcionales solubles en agua en la fracción porosa de los tejidos vegetales. Esto fue el caso de betalainas en manzana (Aguirre-García *et al.*, 2016), compuestos fenólicos en mango (Batista de Medeiros *et al.*, 2019), lactato de calcio en cambuci (Schincariol Paes *et al.*, 2019) y pomelo (Moraga *et al.*, 2009); e

incluso se ha logrado impregnar probióticos como *Lactobacillus plantarum* en manzana (Emser *et al.*, 2017) y modificadores de sabor como humo líquido en manzana (Akharume *et al.*, 2018).

Ingredientes lipofílicos como vitaminas, carotenoides, curcuminoides, ácidos grasos y fitoesteroles presentan efectos beneficiosos para la salud, por lo que podrían mejorar las propiedades funcionales de diversos frutos. Sin embargo, los ingredientes funcionales oleosos son insolubles en agua, lo que dificulta su incorporación en formulaciones alimentarias con base acuosa que presentan conflictos hidrofílicos-hidrofóbicos. Además, los ingredientes oleosos son susceptibles al pH, temperatura, oxígeno y luz durante el procesamiento y almacenamiento (Recharla *et al.*, 2017). Por tanto, se deben desarrollar tecnologías que permitan incorporarlos de forma protegida en los alimentos. Así, las emulsiones aceite en agua (O / W) consisten en pequeñas gotitas de lípidos dispersos en fase acuosa, donde las moléculas de emulsificante rodean cada gotita de aceite.

La formulación de emulsiones requiere el uso de emulsificantes como la goma arábiga (GA), polisacárido anfifílico natural más utilizado en la industria alimentaria debido a su alta solubilidad en agua, baja viscosidad en solución, buena actividad superficial y capacidad para formar una película protectora alrededor de las gotitas de aceite (Chanamai y McClements, 2001; Bai *et al.*, 2017). A diferencia de los emulsificantes a base de proteínas, la GA no es sensible a valores de pH intermedios, fuerzas iónicas y temperaturas elevadas debido a la formación de capas estabilizadoras estéricas gruesas alrededor de las gotitas de aceite (Ozturk *et al.*, 2015). Por otra parte, las proteínas de suero de leche se utilizan ampliamente en emulsiones debido a su alta solubilidad en agua, propiedades interfaciales y buena actividad antioxidante (Hinnenkamp y Ismail, 2021).

Respecto al uso de emulsificantes naturales para proteger e incorporar ingredientes funcionales en tejidos vegetales, Salazar-López *et al.* (2015) impregnaron mediante DO tejido de piña con oleorresina de chile piquín utilizando GA como emulsificante; y Huerta-Vera *et al.* (2017) enriquecieron mediante DO banano con *Lactobacillus rhamnosus* utilizando emulsiones dobles que contenían concentrado de proteína de suero (WPC) como emulsificante.

Las emulsiones O / W son útiles para encapsular ingredientes funcionales lipofílicos e impregnarlos en tejidos vegetales. Este fue el caso de curcuminoides en banano (Bellary y Rastogi, 2014) y rodajas de coco (Bellary *et al.*, 2011), inulina y oleorresina de chile piquín en rodajas de mango (Jiménez-Hernández *et al.*, 2017) y oleorresina de jengibre en mango (Shukla *et al.*, 2019).

Además de las ya mencionadas, otro ingrediente funcional lipofílico con potencial aplicación para el enriquecimiento de frutas es la piperina de la oleorresina de pimienta negra. Este es un alcaloide natural pungente con escasa solubilidad en agua que se encuentra en varias especies *Piper*, como el fruto de la pimienta negra (*Piper nigrum*) y es comúnmente utilizado como condimento alimentario (Li *et al.*, 2019; Quilaqueo *et al.*, 2019). Entre sus efectos farmacológicos están: antiinflamatorios, analgésicos, antioxidantes, antimicrobianos, y actividades inmunomoduladoras y antitumorales (Hou *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019; Quilaqueo *et al.*, 2019; Sunila y Kuttan, 2004).

Respecto a la osmodeshidratación de chayote, Ruíz-López *et al.* (2010) reportaron la DO como un pretratamiento previo al secado convectivo, con lo que lograron menor tiempo de secado y consumo de energía. Sin embargo, hasta el momento, no hay informes disponibles que involucren la impregnación de los ingredientes funcionales lipofílicos en la fracción porosa del tejido del chayote. El presente estudio plantea la impregnación de emulsiones de oleorresina de pimienta negra (OPN) en tejido de chayote mediante DO, lo que mejorará sus propiedades funcionales. Este producto con un contenido de agua intermedio y actividad de agua reducida se puede utilizar como alimento de cocción rápida o como ingrediente en ensaladas y mezclas para sopas. Así, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto del biopolímero emulsificante, cantidad de alcohol, tiempo de inmersión y temperatura de la DO en la pérdida de agua (*WFL*), ganancia de sólidos (*SG*), difusividad aparente del agua, actividad del agua (a_w), color y retención de piperina durante la DO de rodajas de chayote.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Material Vegetal

Chayotes (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) var. *virens levis* y azúcar refinada se obtuvieron en un mercado local. Los frutos de chayote se eligieron de acuerdo con su uniformidad y ausencia de defectos. Las muestras frescas tuvieron contenido de agua de 94.63 ± 0.0045 kg 100 kg⁻¹ (base

fresca), a_w de 0.951 ± 0.0051 y contenido de sólidos solubles totales de 4.40 ± 0.69 %. Como emulsificante se utilizó concentrado de proteína de suero (WPC) con contenido de proteína de 80% en base seca (Food Proteins, México) y goma arábica (GA) (Amfer Foods, México). La oleoresina de pimienta negra (*Piper nigrum*) se obtuvo de Oleoespecias, México. La piperina estándar se obtuvo de M / s. Sigma Chemical Co., St. Louis, Estados Unidos. Todos los disolventes y productos químicos utilizados fueron de grado reactivo.

3.3.2. Preparación de soluciones osmóticas

Se llevó a cabo un trabajo preliminar para estudiar el efecto de la concentración de sacarosa y emulsificante en la viscosidad y estabilidad de la solución de sacarosa con emulsión (datos no mostrados) con el objetivo de que fuera útil como medio de impregnación de piperina. Las concentraciones de sacarosa utilizadas estuvieron en el rango de 40 a 60 % y las de emulsificante de 8 a 26 % (p/p). Los resultados mostraron incremento en la viscosidad a medida que aumentaba la concentración de sacarosa y emulsificante, debido al aumento de solutos y propiedades espesantes de los emulsificantes. Las mejores condiciones se seleccionaron de acuerdo a la menor viscosidad y tiempo de 500 min de estabilidad de la emulsión, lo que permitió mayor transferencia de masa en las muestras de chayote durante el proceso osmótico, que se logró con 43 % de sacarosa y 8.7 % de emulsificante.

Las emulsiones de aceite en agua consistían en oleoresina de pimienta negra y fase acuosa. La fase acuosa constaba de emulsificante (WPC o GA) y solución de sacarosa al 43% en peso. La concentración de oleoresina de pimienta negra en los sistemas de emulsión se fijó en 6.5% (p/p) en proporción de oleoresina de pimienta negra: emulsificante de 3: 4 (p/p). Se dispersó oleoresina de pimienta negra previamente mezclada con etanol en una proporción de 1:1 (WPC1.1 o GA 1.1) o 1:1.5 (WPC1.5 o GA 1.5) (p/p) en solución acuosa de emulsionante mediante homogeneizador de alta velocidad (Milwaukee, mod.5615-20, México) a 20.000 rpm durante 7 min para obtener la emulsión.

3.3.3. Tamaño medio de gota y potencial zeta

Los diámetros medios de partícula (promedios Z), el índice de polidispersidad (PdI) y potencial zeta de las emulsiones se evaluaron utilizando un instrumento de dispersión de luz dinámica (Nano

ZS, 2000; Malvern Instruments, Malvern, Reino Unido). Las muestras se diluyeron 1:100 (v/v) con agua Milli-q. La medición se informó como promedio de tres inyecciones individuales después del proceso de homogeneización y en diferentes tiempos de reposo a 180, 300 y 420 min durante incubación a 25, 35 y 45 °C.

3.3.4. Procedimiento de deshidratación-impregnación

Los chayotes se lavaron con solución desinfectante de hipoclorito de sodio (0.1%), se pelaron y seccionaron axialmente en rodajas de 39 mm de diámetro y 3.9 mm de espesor. Cada rebanada se pesó y se sumergió en solución osmótica con emulsión a 25, 35 y 45 °C, manteniendo la proporción de 1:20 (p / p) fruto: solución. Se utilizó el método continuo de deshidratación osmótica. Las muestras se retiraron a los 10, 30, 60, 110, 180, 240, 300, 360 y 420 min, y el exceso de solución de la superficie se limpió suavemente con papel absorbente. Las muestras se pesaron y volvieron a sumergir inmediatamente en la solución de sacarosa con emulsión para continuar con la DO. Al final del proceso osmótico se determinó el contenido de agua en una estufa de vacío (Heraeus, modelo D-6450 Hanau, Alemania) a 60 °C durante 24 h. La cinética de WFL y SG durante la DO de rodajas de chayote se modeló utilizando las ecuaciones (1) y (2) (Azua *et al.*, 1998):

$$WFL = \frac{s_1 t WFL_{\infty}}{1 + s_1 t} \quad (1)$$

$$SG = \frac{s_2 t SG_{\infty}}{1 + s_2 t} \quad (2)$$

donde WFL es la fracción de agua perdida por el alimento en el tiempo t (min), SG es la fracción de sólidos ganados por el alimento en el momento t , WFL_{∞} es la fracción de agua perdida por el alimento en equilibrio, SG_{∞} es la fracción de sólidos ganados por el alimento en equilibrio, s_1 es la constante relacionada con la tasa de pérdida de agua (min^{-1}), s_2 es la constante relacionada con la tasa de sólidos solubles ganados por el alimento (min^{-1}).

Los datos de WFL y SG se obtuvieron a partir de la pérdida de masa (ML) durante la osmodeshidratación, que es igual a la pérdida de agua (WFL) menos los sólidos ganados (SG).

$$ML = \frac{m_0 - m_t}{m_0} = WFL - SG \quad (3)$$

Donde m_0 es el peso inicial en el momento $t = 0$ y m_t es el peso en el momento $t = t$.

De acuerdo con el método continuo al graficar t/ML vs t , se obtiene una línea recta con pendiente p y intersección b , de la cual se pueden derivar las siguientes ecuaciones:

$$WFL_{\infty} = \frac{\left(\frac{1}{p}\right)}{\left[1 - \left(\frac{SG}{WFL}\right)_L\right]} \quad (4)$$

$$s_1 = \frac{\left(\frac{1}{b}\right)}{WFL_{\infty} \left[1 - \left(\frac{SG}{WFL}\right)_L\right]} \quad (5)$$

$$SG_{\infty} = \frac{\left(\frac{1}{p}\right)}{\left[\left(\frac{WFL}{SG}\right)_L - 1\right]} \quad (6)$$

$$s_2 = \frac{\left(\frac{1}{b}\right)}{SG_{\infty} \left[\left(\frac{WFL}{SG}\right)_L - 1\right]} \quad (7)$$

El subíndice "L" significa que WFL y SG se determinan en el último punto del experimento, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$WFL_L = \frac{m_0 x_0 - m_L x_L}{m_0} \quad (8)$$

$$SG_L = \frac{m_0(X_0-1)-m_L(X_L-1)}{m_0} \quad (9)$$

donde m_L es el peso al final del proceso osmótico, X_0 contenido de humedad inicial (base húmeda), X_L es el contenido de humedad en el alimento (base húmeda) al final del proceso osmótico. Para calcular la variación en el coeficiente de difusión del agua (D_w) para una muestra con forma de placa durante la deshidratación osmótica, se utilizó la siguiente ecuación (Azuara *et al.*, 1992):

$$D_w = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{s_1 l}{1+s_1 t} \right) \left(\frac{WFL_{\infty}^{mod}}{WFL_{\infty}^{exp}} \right) \right]^2 \quad (10)$$

donde l es la mitad del espesor de la placa, *mod* hace referencia al valor de WFL_{∞} determinado por el modelo y *exp* hace referencia al valor de WFL_{∞} determinado a partir de los datos experimentales.

La ecuación (10) se estimó mediante regresión no lineal utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt implementado en el software KaleidaGraph 4.5.2 (Synergy Software, EE. UU.).

3.3.5. Análisis de rodajas de chayote osmodeshidratado

Se midió a_w (con un medidor de actividad de agua Novasina LabMASTER, mod. estándar, US.), sólidos solubles totales (con un equipo ATAGO, PAL-1, Japón) y los parámetros de color (con el sistema KONICA MINOLTA[®], mod. CR-400, Japón); con estos se calculó el cambio total de color (ΔE) con la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(L_i^* - L_0^*)^2 + (a_i^* - a_0^*)^2 + (b_i^* - b_0^*)^2} \quad (11)$$

donde, L_i^* , a_i^* y b_i^* son los valores de color de las muestras procesadas y L_0^* , b_0^* y a_0^* son los valores de color de las muestras frescas.

La cuantificación de piperina en chayote osmodeshidratado se midió con el método espectrofotométrico reportado por Nisha *et al.* (2009). El contenido de piperina se calculó a partir de una curva estándar obtenida con piperina pura en un rango de concentración entre 0 y 100 ppm y los resultados fueron expresados en mg piperina 100 g⁻¹ fruto osmodeshidratado. La ecuación de regresión que correlaciona la densidad óptica a 343 nm y contenido de piperina es $y = 0.0378 + 93.961x$ ($R^2 = 0.997$).

La microestructura de las muestras de chayote fresco y osmodeshidratado se observó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). El tejido de chayote previamente liofilizado (Labconco, Freezone 4.5) a 0.113 mbar y -85 °C durante 120 h se montó sobre acero inoxidable y se recubrió con oro en un ionizador JFC-1100[®] para ser observado en microscopio electrónico de barrido JSM-35C[®] (JEOL LTD, Tokio, Japón) con aceleración de 30 KV y magnificación en rango de X100 a X300.

3.3.6. Análisis estadístico

Todas las evaluaciones se hicieron por triplicado, y los resultados se presentan como medias \pm desviación estándar de las repeticiones. Para todos los experimentos se implementó un diseño experimental factorial 2 x 2 x 3. Los niveles de los factores fueron: biopolímero emulsificante (WPC y GA), cantidad de alcohol (1 y 1.5) y temperatura (25, 35 y 45 °C). Todos los datos se analizaron con el software R-Project (R) 4.0.3 de libre distribución, aplicando ANDEVA con significancia del 0.05. La significancia de las diferencias entre los grupos se evaluó mediante la prueba de Tukey.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Tamaño de partícula, índice de polidispersidad y potencial zeta de emulsiones

El tamaño de partícula, índice de polidispersidad (PdI) y potencial zeta de las emulsiones de oleorresina de pimienta negra (OPN) dentro de la solución osmótica inmediatamente después de su elaboración (t = 0 min) a diferentes temperaturas se muestra en el Cuadro 3-1.

Cuadro 3-1. Tamaño, Índice de polidispersión (PdI) y Potencial Zeta de la solución osmótica con emulsión recién elaborada en función de la concentración de etanol y temperatura.

Solución osmótica con emulsión	Temperatura (°C)	Tamaño (nm)	PdI	Potencial Zeta (mV)
WPC1.1	25	154.50 ± 2.97 ^f	0.287 ± 0.008 ^f	-28.92 ± 1.0402 ^{bc}
	35	154.60 ± 4.03 ^f	0.302 ± 0.012 ^{ef}	-28.56 ± 0.4219 ^{abc}
	45	156.60 ± 2.88 ^f	0.314 ± 0.008 ^{ef}	-28.32 ± 0.3492 ^{ab}
WPC1.5	25	167.84 ± 3.05 ^f	0.284 ± 0.007 ^f	-27.50 ± 0.3535 ^{ab}
	35	166.75 ± 5.56 ^f	0.306 ± 0.009 ^{ef}	-27.30 ± 0.3807 ^a
	45	168.96 ± 2.06 ^f	0.328 ± 0.040 ^e	-27.24 ± 0.4878 ^a
GA1.1	25	679.48 ± 8.67 ^e	0.544 ± 0.012 ^d	-32.30 ± 0.5830 ^f
	35	692.60 ± 6.69 ^{de}	0.558 ± 0.008 ^{cd}	-32.22 ± 0.8584 ^{ef}
	45	709.06 ± 10.19 ^d	0.567 ± 0.009 ^{bcd}	-31.44 ± 0.7503 ^{ef}
GA1.5	25	1070.5 ± 21.64 ^c	0.579 ± 0.010 ^{abc}	-30.65 ± 0.3316 ^{de}
	35	1153.8 ± 21.46 ^b	0.600 ± 0.010 ^{ab}	-30.92 ± 0.7274 ^{def}
	45	1236.7 ± 13.66 ^a	0.612 ± 0.010 ^a	-29.80 ± 1.0936 ^{cd}

Valores medios ± desviación estándar. GA, goma arábiga. WPC, concentrado de proteína de suero. 1.1, relación oleorresina de pimienta negra: etanol 1:1. 1.5, proporción de oleorresina de pimienta negra: etanol 1:1.5. Los promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

WPC en la solución osmótica presentó tamaños de partícula inferiores a 169 nm. Mientras que los tamaños de partícula para las emulsiones de GA en la solución osmótica variaron de 679 a 1236 nm. Estos resultados sugieren que WPC puede usarse para producir emulsiones de oleorresina de pimienta negra con gotas dispersas en el rango nanométrico. De acuerdo con Bouyer *et al.* (2011) la formación de gotas más grandes durante el proceso de emulsificación se puede atribuir al peso molecular del emulsificante, siendo de 180 000 y 18 400 g mol⁻¹ para GA y WPC (Bai *et al.*, 2016), por lo que GA necesitó más tiempo para adsorberse en la interfaz. Adicionalmente GA presenta actividades interfaciales relativamente bajas en comparación con las proteínas, lo cual está relacionado con su capacidad para adsorberse en la interfaz aceite/agua y reducir la tensión interfacial. Flores *et al.* (2021) encontraron valor de tensión interfacial de 17.04 y 15.37 mN m⁻¹ para GA y WPC a concentración de emulsificante de 2.5 % (p/p) en emulsiones de oleorresina de pimienta, lo que indicó que el reordenamiento de WPC en la interfaz de la fase oleosa y acuosa mejoran la estabilidad y disminuyen la tensión interfacial.

La homogeneidad de la distribución del tamaño de partículas se mide mediante el índice de polidispersidad (PdI). El PdI no posee dimensiones y puede alcanzar valor máximo arbitrariamente limitado a 1.0. Un valor de PdI de 1 indica que el sistema tiene distribución amplia de tamaños de partículas y puede contener agregados que podrían formar sedimentos lentamente (Vicente *et al.*, 2018). El PdI para emulsiones de WPC y GA dentro de la solución osmótica inmediatamente después de su elaboración varió de 0.284 a 0.328 y 0.544 a 0.612, respectivamente (Cuadro 3-1). Valores máximos de PdI de 0.3 para WPC indican distribución de tamaño de partícula estrecha y menor dispersión. Por el contrario, valores de PdI superiores a 0.5 para GA denotan amplia distribución de tamaño de partícula y mayor dispersión.

Por otra parte, la magnitud de la carga eléctrica (potencial zeta) en las gotas desempeña un rol importante en la estabilización de las emulsiones. El potencial zeta indica la carga de la doble capa eléctrica, por lo tanto, cuanto más lejos de la neutralidad, mayor es la repulsión electrostática entre la fase oleosa y acuosa, lo que disminuye la interacción en la interfaz. Las emulsiones de WPC y GA dentro de la solución osmótica inmediatamente después de su elaboración tenían pH de 6.2 y 4.2, y potencial zeta negativo que varió de -27.24 a -28.92 mV y -29.80 a -32.30 mV, respectivamente (Cuadro 3-1). Estos valores se encuentran dentro del rango de los reportados por Ozturk *et al.* (2015) quienes evaluaron la estabilidad de emulsiones de aceite de naranja y vitamina E en rango de pH entre 2 y 8, reportaron variación de potencial zeta de 47 a -48 y de -2 a -32 mV para aislado de proteína de suero y GA. Harnsilawat *et al.* (2006) informaron que el potencial zeta de las gotitas de emulsión depende en gran medida del pH. En este estudio, las emulsiones de OPN estabilizadas con WPC presentan carga eléctrica negativa debido a que el pH se encuentra por arriba de su punto isoeléctrico (pH 4.7-5.2), la disminución en la magnitud de la carga de las gotas a este pH provoca inestabilidad debido a que la atracción de van der Waals domina la repulsión electrostática, lo que conduce a la floculación de las gotas (Du *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2020). En cambio, GA estabiliza emulsiones principalmente por repulsión estérica debido a su capacidad para formar capas hidrófilas gruesas alrededor de las gotitas de aceite y carga eléctrica de las gotas puede no ser crítica para la estabilidad (Ozturk *et al.*, 2015). Por tanto, las emulsiones de OPN estabilizadas con WPC son más inestables en comparación con GA.

El tamaño de partícula de las emulsiones de OPN se vio afectado negativamente al incrementar la concentración de etanol, tiempo de incubación y temperatura, lo que indica que el aumento en

cualquiera de estos parámetros promueve la desestabilización de la emulsión en la solución osmótica (Figura 3-1). Las emulsiones de WPC1.1 fueron relativamente estables durante 420 min de incubación a diferentes temperaturas. Esto podría deberse a que los biopolímeros anfifílicos como WPC proveen estabilidad a través de repulsión electrostática, la cual depende de su concentración, pH y fuerza iónica de la solución; este fenómeno de estabilización suele ser débil, pero sucede simultáneamente con la estabilización estérica que previene que las partículas se aproximen (Peredo-Luna y Jiménez-Munguía, 2012).

El aumento de la concentración de etanol en las emulsiones de OPN (WPC1.5 y GA1.5) genera incremento del tamaño de partícula. Vázquez *et al.* (1995) demostraron que la tensión superficial de las soluciones acuosas de alcohol disminuye con el aumento de las concentraciones de alcohol, y la reducción más apreciable ocurre a bajas concentraciones de alcohol. No obstante, la adición de alcohol puede promover el despliegue de proteínas, exponiendo así el interior hidrofóbico de las proteínas a la fase acuosa circundante, lo que aumentaría las interacciones hidrofóbicas atractivas entre las gotitas recubiertas de emulsificante (McClements, 2004; Zeeb *et al.*, 2014) estudiaron el impacto del alcohol en la formación de nanoemulsiones aceite en agua utilizando proteínas como emulsificantes, y cuando utilizaron gelatina como emulsificante, el aumento de la concentración de etanol en la emulsión generó inestabilidad e incremento del tamaño de partícula y lo atribuyeron a la baja actividad superficial del emulsificante.

Cuando incrementa la temperatura del medio osmótico las gotitas de emulsión incrementan la velocidad y amplitud de su vibración, esto facilita su desplazamiento generando aumentos significativos del tamaño de partícula de las emulsiones de OPN (Figura 3-1).

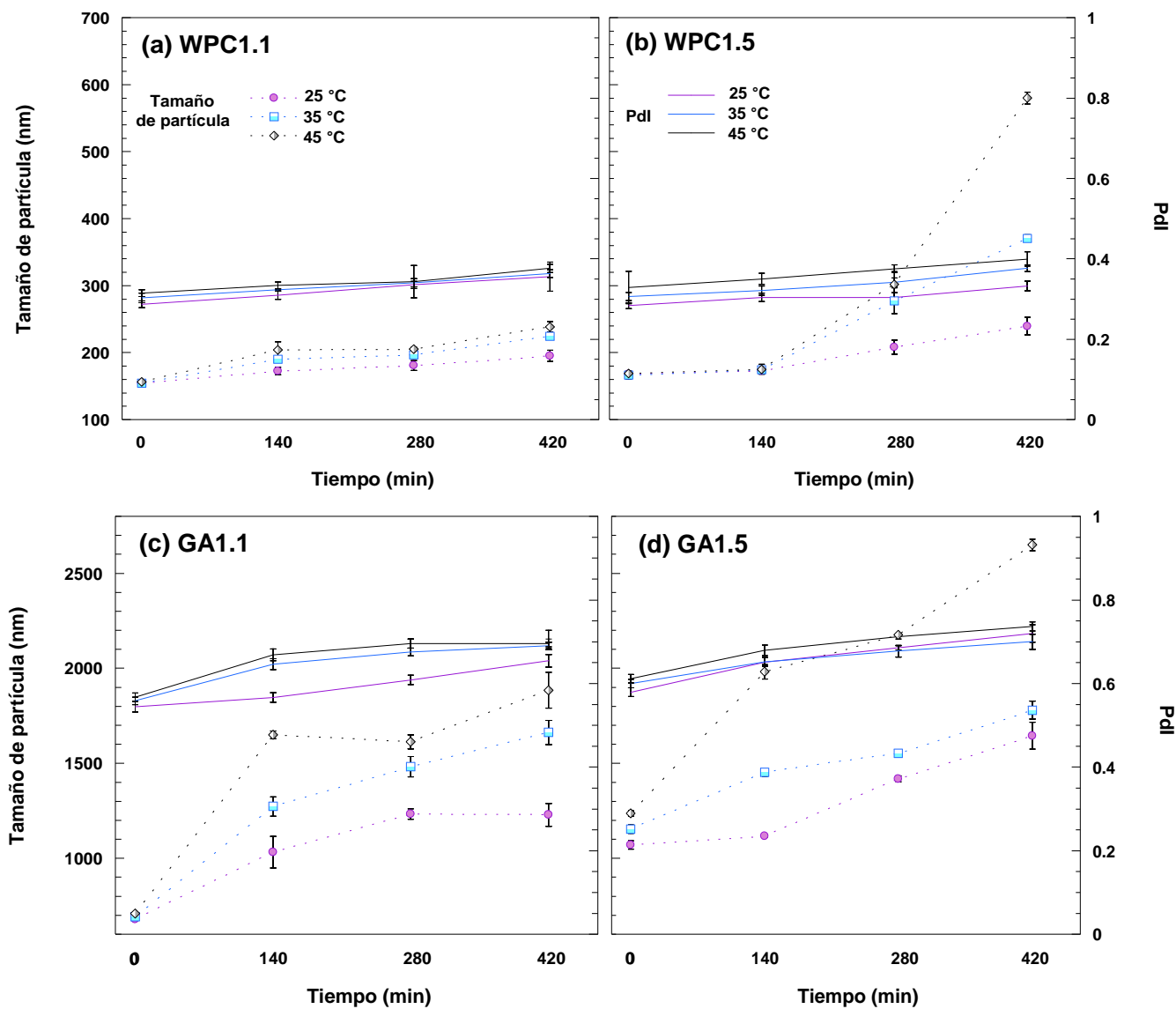


Figura 3-1. Variación del tamaño de partícula (símbolos) e índice de polidispersidad (líneas continuas) de emulsiones preparadas con goma arábiga (GA) y concentrado de suero de leche (WPC) a diferentes concentraciones de etanol y temperaturas.

El tratamiento térmico de proteínas de suero de leche a temperaturas inferiores a 60 °C induce desnaturalización reversible y pérdida parcial de la estructura terciaria (Diah *et al.*, 2020). Euston *et al.* (2000) estudiaron la estabilidad térmica de emulsiones de aceite de soya en agua utilizando WPC como emulsificante; y encontraron que las proteínas no adsorbidas en la superficie de gotas de aceite al ser desnaturalizadas por el calor actúan como pegamento y forman agregados con las proteínas que si fueron adsorbidas en la superficie de las gotas de aceite. En contraste, GA no es sensible a la agregación a pH intermedio y elevada fuerza iónica y temperatura; esto se debe a que forma capas estéricas gruesas alrededor de las gotas de aceite (Bai *et al.*, 2017). Esto sugiere que el aumento del tamaño de partícula en emulsiones estabilizadas con GA pudo ocurrir por pérdida de estabilidad física debido a la composición en la interfaz, grosor de la película interfacial y posible desplazamiento durante la incubación (Hinnenkamp e Ismail, 2021).

En cuanto a la presencia de sacarosa en las emulsiones de OPN, Blijdenstein *et al.* (2004) reportaron que la sacarosa puede modificar las propiedades fisicoquímicas de proteínas y polisacáridos de diversas formas. Belyakova *et al.* (2003) estudiaron el efecto de la sacarosa en los parámetros moleculares y de interacción del caseinato de sodio en medio acuoso; ellos encontraron que la sacarosa causó desagregación de las proteínas mejorando la solubilidad mediante enlaces de hidrógeno por encima de su punto isoeléctrico. Esta podría ser la causa de la mejora de la miscibilidad de las mezclas de proteínas y polisacáridos. Algunos autores han investigado la influencia de la sacarosa en la incompatibilidad termodinámica de mezclas de biopolímeros como aislado de proteína de suero β -glucano de avena (Kontogiorgos *et al.*, 2009), caseinato de sodio de goma de algarrobo (NaCas) y goma guar-NaCas (Spyropoulos *et al.*, 2010); sus resultados muestran que el impacto de la sacarosa en los sistemas varía dependiendo del tipo y concentración de carbohidrato, así como la naturaleza y carga eléctrica superficial de los polímeros utilizados.

Por otra parte, el PdI para emulsiones de WPC fue inferior a 0.5 y superior para emulsiones de GA durante los 420 min de incubación (Figura 3-1); esto sugiere que las gotitas de GA estaban más agregadas en comparación con WPC. Vicente *et al.* (2018) menciona que las emulsiones alimentarias convencionales presentan varios tamaños de partícula y el PdI se vuelve alto, por lo que es complicado caracterizar en comparación con los sistemas monodispersos (PdI inferior a 0.2).

La Figura 3-2 muestra el potencial zeta de las emulsiones de OPN dentro de la solución osmótica durante 420 min de incubación a diferentes temperaturas. El potencial zeta para las emulsiones de WPC y GA dentro de la solución osmótica durante la incubación varió de -25.40 a -28.92 mV y -26.50 a -32.30 mV, respectivamente (Figura 3-2). De acuerdo con Mirhosseini *et al.* (2008) un potencial zeta menor o mayor que 25 mV, en valor absoluto, es indicativo de emulsiones flocculadas (menos de -25 mV) y desfloculadas (mayores de + 25 mV). Los resultados de este estudio indican disminución en la magnitud de la carga de las gotitas de las emulsiones de OPN, sin embargo, el PDI (Figura 1) se mantiene constante. Esto podría explicarse por la estabilización estérica o impedimento estérico, mecanismo de estabilización dominante cuando se utilizan biopolímeros como proteínas y polisacáridos, los cuales se adsorben en la interfaz y reducen la movilidad de las gotitas.

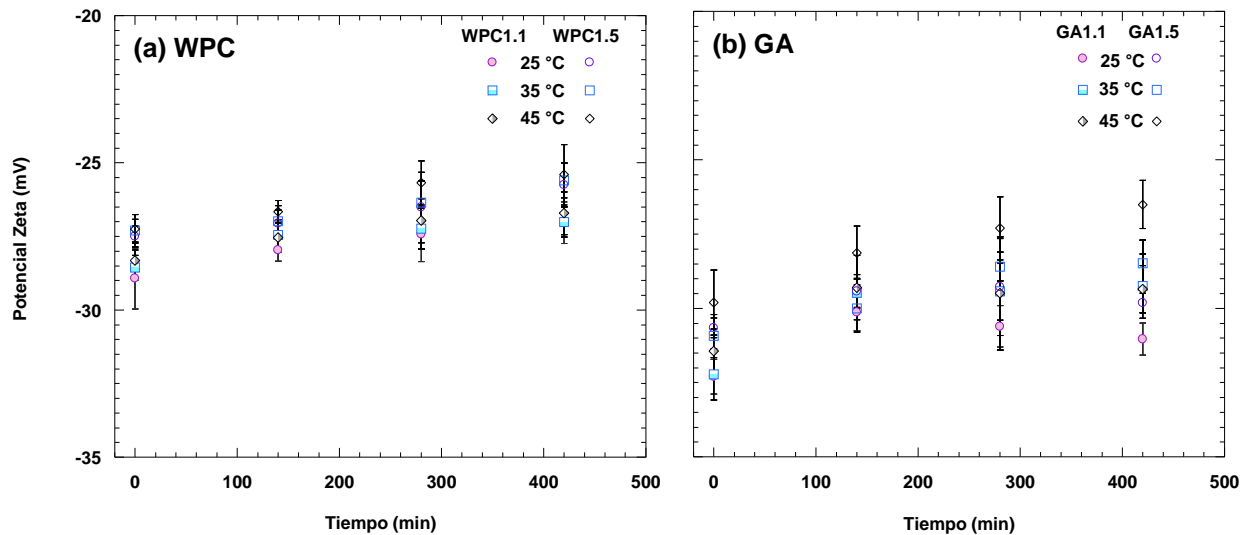


Figura 3-2. Potencial zeta de las emulsiones preparadas con concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA) a diferentes concentraciones de etanol durante su permanencia en la solución osmótica a diferentes temperaturas.

3.4.2. Cinéticas de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica

Se analizó la posibilidad de utilizar solución hipertónica de sacarosa como fuerza motriz para impregnar emulsiones de piperina en tejido de chayote y reducir el contenido de agua por difusión. La cinética de WFL y SG de rodajas de chayote durante la DO se muestran en la Figura 3-3. Los valores de las constantes s_1 , WFL_{∞} , SG_{∞} y R^2 se dan en la Cuadro 3-2 y fueron obtenidos por el método continuo. Los valores altos de R^2 sugirieron la idoneidad del modelo de Azuara para

describir la cinética de transferencia de masa durante la DO de rodajas de chayote en solución osmótica con emulsiones de WPC y GA con concentración variable de etanol. Los valores de *WFL* y *SG* aumentaron de manera no lineal en todos los tratamientos osmóticos.

El comportamiento general de la transferencia de masa muestra (Figura 3-3) el predominio de la remoción de agua, en comparación con la impregnación de sólidos en rodajas de chayote. La cinética de transferencia de masa se puede dividir en dos fases: (i) fase de intercambio de masa con mayor intensidad (120 min); y (ii) fase decreciente donde los valores de intercambio de masa disminuyen, sugiriendo que el sistema alcanzó un estado de pseudo-equilibrio debido a la reducción de los potenciales químicos del agua y soluto entre el chayote y solución osmótica.

La Figura 3-3a y b muestra que las temperaturas mayores aumentaron la velocidad de *WFL* del chayote en los primeros minutos del proceso. Estos resultados corroboran los valores de los parámetros cinéticos s_1 obtenidos por el modelo de Azuara (Cuadro 3-2). Esto puede estar relacionado con reducción de la viscosidad del medio osmótico y modificación de las propiedades viscoelásticas del producto debido al hinchamiento y plastificación de las membranas celulares; esto resulta en mayor transferencia de masa. Se reportaron tendencias similares en el tratamiento osmótico de rodajas de carambola (Ruíz-López *et al.*, 2011) y cilindros de calabaza (Abraão *et al.*, 2013) en soluciones de sacarosa, así como los resultados de Jiménez-Hernández *et al.* (2017) quienes estudiaron la DO de rodajas de mango en solución de sacarosa con emulsiones de inulina y oleorresina de chile piquín.

El efecto del tipo de emulsificante y concentración de etanol de la emulsión en la *WFL* del chayote no generó diferencias. Sin embargo, cuando se utilizó WPC1.5 a 45 °C la *WFL* de chayote fue significativamente menor en comparación con los tratamientos osmóticos de 25 y 35 °C (Figura 3-3a).

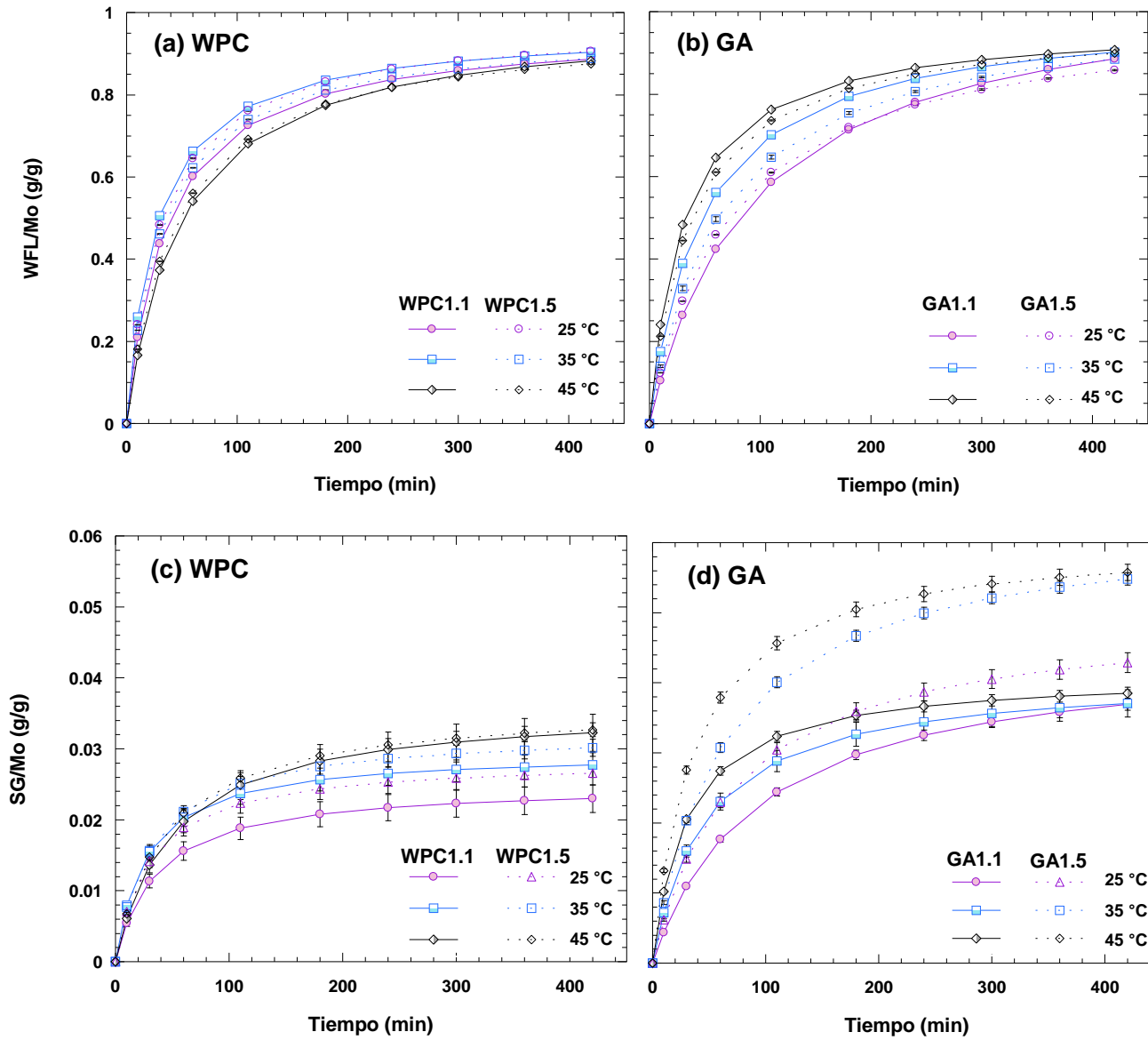


Figura 3-3. Cinética de pérdida de agua y ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote utilizando solución osmótica con emulsiones con concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábiga (GA), como emulsionantes. (a) WFL-WPC, (b) WFL-GA, (c) SG-WPC, (d) SG-GA.

Cuadro 3-2. Parámetros obtenidos con el método continuo para deshidratación osmótica de rodajas de chayote utilizando solución osmótica con emulsiones de concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábiga (GA), como emulsionantes.

Solución osmótica con emulsión	Temperatura (°C)	s_I (min ⁻¹)	WFL _∞ /M ₀	SG _∞ /M ₀	R ²
WPC1.1	25	0.027848 ^d	0.9624 ± 0.0018 ^f	0.0249 ± 0.0018 ^f	0.9989
	35	0.036955 ^a	0.9614 ± 0.0016 ^{fg}	0.0295 ± 0.0016 ^e	0.9983
	45	0.020285 ^g	0.9868 ± 0.0025 ^d	0.0360 ± 0.0025 ^d	0.9982
WPC1.5	25	0.032929 ^b	0.9721 ± 0.0015 ^e	0.0285 ± 0.0015 ^{ef}	0.9984
	35	0.031074 ^c	0.9566 ± 0.0011 ^g	0.0324 ± 0.0011 ^{de}	0.9990
	45	0.023080 ^e	0.9654 ± 0.0009 ^f	0.0360 ± 0.0009 ^d	0.9989
GA1.1	25	0.010724 ^j	1.0826 ± 0.0009 ^a	0.0451 ± 0.0009 ^c	0.9960
	35	0.021149 ^f	1.0033 ± 0.0019 ^c	0.0412 ± 0.0019 ^c	0.9946
	45	0.032930 ^b	0.9732 ± 0.0007 ^e	0.0413 ± 0.0007 ^c	0.9978
GA1.5	25	0.014054 ⁱ	1.0038 ± 0.0014 ^c	0.0501 ± 0.0014 ^b	0.9935
	35	0.015642 ^h	1.0182 ± 0.0032 ^b	0.0630 ± 0.0008 ^a	0.9943
	45	0.027895 ^d	0.9761 ± 0.0011 ^e	0.0605 ± 0.0011 ^a	0.9972

Valores medios ± desviación estándar. GA, goma arábiga. WPC, concentrado de proteína de suero. 1.1, relación oleorresina de pimienta negra: etanol 1:1. 1.5, proporción de oleorresina de pimienta negra: etanol 1:1.5. Los promedios con la misma letra no son significativamente diferentes en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Este efecto puede deberse a la formación de una capa superficial de sólidos por la desnaturalización de WPC y acumulación de sacarosa que bloquean los poros en la superficie de las rodajas de chayote, dificultando la WFL. Las proteínas de WPC comienzan a relajarse molecularmente a temperaturas inferiores a 60 °C (Setiowati *et al.*, 2020; Vasbinder *et al.*, 2001), y la velocidad de este proceso incrementa en medios acuosos (Haque *et al.*, 2013) como el tejido vegetal de chayote y solución osmótica de sacarosa. Además, el etanol promueve el despliegue de proteínas y agregación de gotas, lo que concuerda con el aumento del tamaño de partícula de emulsiones de WPC (Figura 3-1). Flores-Andrade *et al.* (2013) osmodeshidrataron rodajas de manzana en mezclas acuosas de sacarosa y WPC; ellos reportaron la formación de una capa de proteína sobre la muestra que afectó significativamente la transferencia de masa durante la DO.

La Figura 3-3c y d muestra la cinética de *SG* durante la DO rodajas de chayote. Similar al efecto observado en la *WFL*, el aumento de la temperatura del medio osmótico provocó un incremento de la *SG* del chayote. Esta influencia de la temperatura en los tratamientos osmóticos ha sido claramente demostrada en trabajos anteriores (Dermesonlouoglou y Giannakourou, 2018; Jiménez-Hernández *et al.*, 2017; Ruiz-López *et al.*, 2011). Respecto al tipo de emulsificante, las muestras con emulsión de GA aumentaron significativamente la *SG* en comparación con los resultados con emulsión de WPC en la solución osmótica (Figura 3-3c y d). La acumulación de sacarosa de bajo peso molecular alrededor de las rodajas crea una costra que actúa como barrera para la transferencia de masa, limitando la *SG* del chayote. Cuando se utilizó GA como emulsificante pudo existir protonación de los grupos ácidos carboxílicos del polisacárido (-COOH) con la superficie del tejido vegetal y por tanto presentar mayor adsorción de emulsión en el chayote. Esto concuerda con los resultados obtenidos por García *et al.* (2010) quienes estudiaron la influencia de los recubrimientos de quitosano en la DO de los cubos de papaya usando soluciones de sacarosa.

El aumento de la concentración de etanol incrementó la *SG* del chayote; esto corrobora los valores de los parámetros cinéticos SG_{∞} obtenidos por el modelo de Azuara (Cuadro 3-2). Esto puede estar relacionado con la capacidad del etanol para reducir la viscosidad de los ingredientes aceitosos contenidos en el medio osmótico y con mayor relajación del emulsificante e incremento del tamaño de partícula y PDI (Figura 3-1).

3.4.3. Actividad de agua

La transferencia de masa lograda por la remoción de agua y la impregnación de solutos en el tejido durante la DO provocó disminución en la a_w de la fruta. La a_w del chayote recién cortado fue 0.951 ± 0.0051 , mientras que la a_w de las rodajas de chayote osmóticamente deshidratadas varió de 0.942 ± 0.0025 a 0.858 ± 0.0032 (Figura 3-4). La a_w se redujo sustancialmente con el tiempo de inmersión y temperatura de DO. La influencia del tiempo de inmersión en la a_w también se observó en los tratamientos osmóticos de banano (Huerta-Vera *et al.*, 2017), albaricoque (Dermesonlouoglou y Giannakourou, 2018) e higo verde (De Mello Jr *et al.*, 2019).

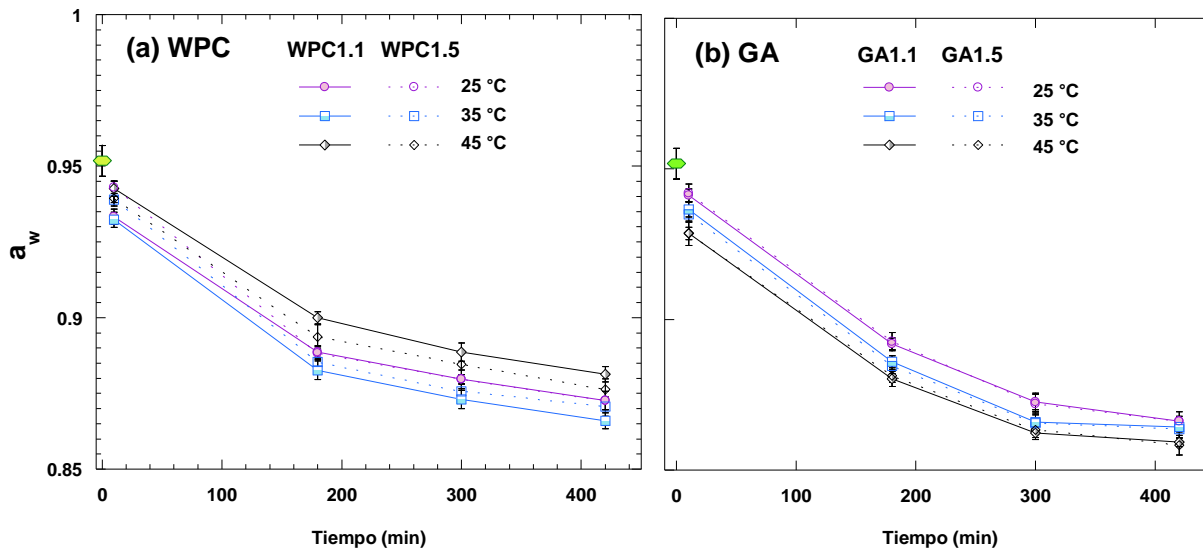


Figura 3-4. Actividad del agua (a_w) de rodajas de chayote durante la deshidratación osmótica con solución osmótica con emulsiones usando concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA), como emulsionantes.

La influencia de la temperatura fue demostrada por Assis *et al.* (2016) y Vieira *et al.* (2011) para manzana y guayaba. La influencia del tipo de emulsificante en la a_w del chayote fue más efectiva en rodajas tratadas con emulsiones de GA en comparación con emulsiones de WPC; esto probablemente a la formación de recubrimiento de GA y sacarosa sobre la superficie del chayote que deprime la a_w del mismo. Esto concuerda con la *WFL* obtenida en muestras procesadas con emulsiones de WPC en comparación con emulsiones de GA. Si bien la concentración de etanol influyó en la a_w de las rodajas de chayote, no se observaron diferencias significativas entre la concentración 1.1 y 1.5.

La a_w es un factor intrínseco relacionado con el agua libre en los sistemas alimentarios disponible para el crecimiento microbiano y reacciones bioquímicas que afectan la calidad de los productos. En este sentido, la DO es una alternativa viable que permite disminuir la a_w en el fruto de chayote. Así, la DO prolonga la vida útil, microbiológica y disminuye la tasa relativa de reacciones de deterioro de rodajas de chayote (De Mello Jr *et al.*, 2019; Moraga *et al.*, 2011).

3.4.4. Difusividad efectiva

La DO es un proceso de difusión regulado entrópicamente por la estructura de las células vegetales y relacionado con los cambios microestructurales que estas experimentan derivados de *WFL* y *SG*. Los coeficientes de difusividad del agua (D_w) obtenidos para el procesamiento osmótico del chayote calculados con la ecuación (10) se presentan en la Figura 3-5.

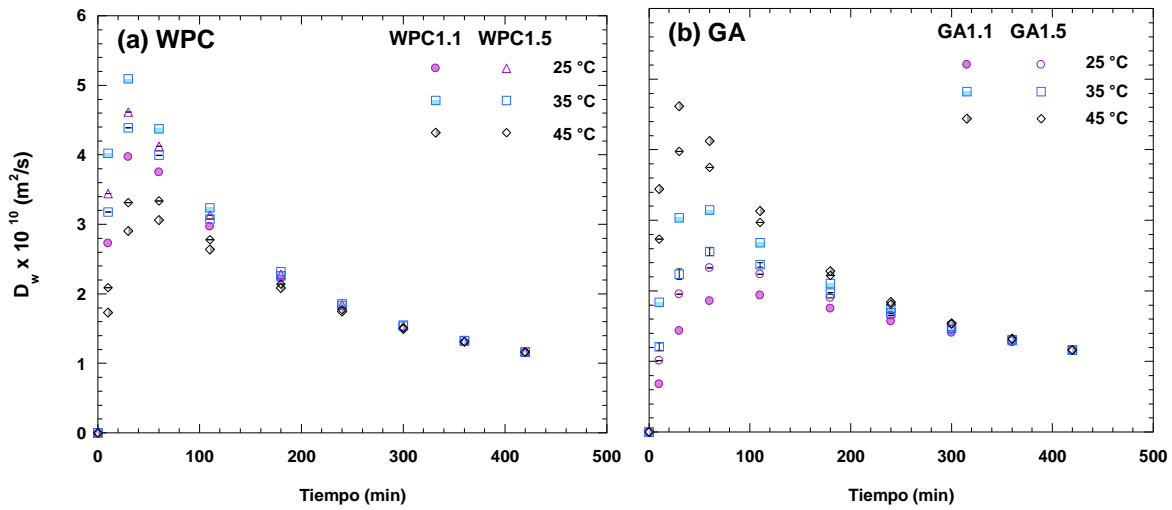


Figura 3-5. Difusividad efectiva del agua (D_w) durante la deshidratación osmótica de rodajas de chayote usando solución osmótica con emulsiones usando concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábica (GA), como emulsionantes.

El modelo de Azuara considera los D_w variables en el tiempo que toma el tratamiento osmótico. Los valores medios del coeficiente de difusión efectiva con el modelo de Azuara variaron de 1.45×10^{-10} a $2.77 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Los valores de los coeficientes de difusión efectiva poseen un orden de magnitud similar y son análogos a los obtenidos en el tratamiento osmótico de tomate (Gomes Corrêa *et al.*, 2016), zanahoria, berenjena y remolacha (Junqueira *et al.*, 2020). De acuerdo con el modelo de Azuara, al inicio del proceso osmótico se observan valores altos de D_w debido a mayor contenido de agua en las rodajas. Luego, D_w disminuye de manera casi lineal a medida que transcurre el tiempo de procesamiento y el contenido de agua disminuye en las rodajas. D_w se vio favorecido por el incremento de la temperatura de procesamiento. Sin embargo, cuando se utilizó WPC como emulsificante a $45 \text{ }^\circ\text{C}$ dio como resultado la disminución significativa de D_w en comparación con tratamientos a 25 y $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 3-5a); esto puede deberse a formación de una

capa de solutos (sacarosa y WPC) sobre la superficie de las rodajas que actúa como barrera para la difusividad del agua.

En general, la influencia de la temperatura en el D_w puede deberse al efecto directo en la permeabilidad de la membrana del tejido y reducción de la viscosidad de las soluciones, lo que reduce la resistencia externa a la transferencia de masa y promueve la difusividad del agua. Este comportamiento también se observó en los tratamientos osmóticos de manzana (Assis *et al.*, 2016), melón (Miranda Pinheiro *et al.*, 2017) y jamun negro (Sharma y Dash, 2019). En cuanto a la influencia del tipo de emulsificante en el D_w de chayote, las muestras tratadas con emulsión de WPC en la solución osmótica incrementaron significativamente el D_w de chayote en comparación con emulsión de GA (Figura 3-5a y b). Este comportamiento refleja la facilidad con que las moléculas de agua se mueven a través de la matriz vegetal del chayote cuando se usa WPC como emulsificante, debido al tamaño de partícula inferior de emulsiones de WPC en comparación con las emulsiones de GA (Figura 3-1).

Por otro lado, el aumento de la concentración de etanol en la emulsión provocó incremento de D_w a 25 °C. Sin embargo, en tratamientos a 35 y 45 °C, el incremento de la concentración de etanol no mejoró la D_w de las muestras. Esto puede deberse a la acumulación superficial de sacarosa y WPC desnaturalizada por efecto del alcohol; lo cual bloquea los poros superficiales y dificulta la difusión de agua a través de la membrana semipermeable del tejido vegetal. Giraldo *et al.* (2003) demostraron que la menor transferencia de masa en el proceso osmótico estaba relacionada con el efecto de endurecimiento provocado por la rápida deshidratación-colapso de las células externas, lo que inhibe el avance del proceso a través de la parte interna del tejido.

3.4.5. Impregnación de piperina

La impregnación de piperina en tejido de chayote a partir de emulsiones de OPN se puede observar en la Figura 3-6. El contenido de piperina en chayote aumentó de manera constante con el incremento del tiempo de inmersión en todos los tratamientos osmóticos.

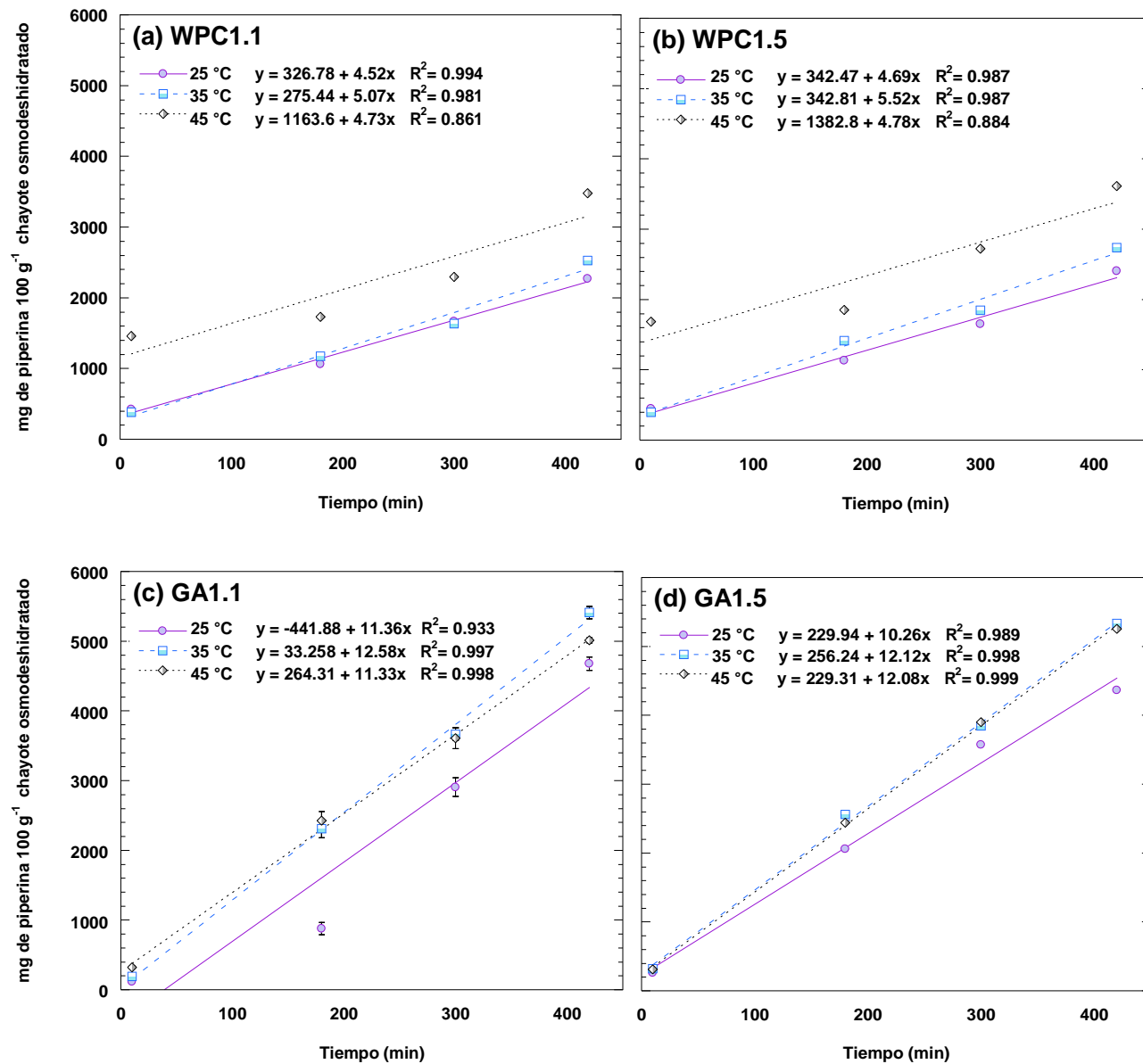


Figura 3-6. Contenido de piperina en tejido de chayote durante el tratamiento osmótico utilizando solución osmótica con emulsiones de concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábiga (GA), como emulsificantes.

La Figura 3-6 muestra que la temperatura de proceso más alta promovió mayor impregnación de piperina en las rodajas de chayote. Sin embargo, los valores de las pendientes muestran que la mayor velocidad de impregnación se logró a 35 °C para todos los tratamientos. Si bien las altas temperaturas aumentan la transferencia de masa debido a que hacen disminuir la viscosidad de la solución osmótica reduciendo la resistencia externa a la transferencia de masa, además pueden dañar los tejidos vegetales y ralentizar la transferencia de masa.

En cuanto a la influencia del tipo de emulsificante en el contenido de piperina en las rodajas de chayote, se observaron diferencias significativas entre las muestras tratadas con emulsiones de WPC y GA en la solución de sacarosa. El contenido de piperina en las rodajas de chayote tratado con emulsiones GA varió de 115.6 ± 2.0 a 5410.6 ± 88.2 mg piperina (100 g^{-1} en base seca) y aumentó de forma casi lineal a medida que incremento el tiempo de tratamiento. En cambio, cuando se utilizaron emulsiones de WPC en la solución osmótica, la impregnación de piperina en rodajas de chayote fue de 381.9 ± 69.6 a 3616.1 ± 179.5 mg piperina (100 g^{-1} en base seca) de forma no lineal; esto podría deberse a la formación de una capa de proteína en la superficie de las muestras que afectó significativamente la transferencia de masa durante el proceso osmótico.

La concentración de etanol en la emulsión no mostró efecto significativo en la impregnación de piperina en tejido de chayote. La impregnación de oleorresina en tejido vegetal fue informada por Jiménez-Hernández *et al.* (2017); ellos sumergieron rodajas de mango durante 120 min en emulsión de oleorresina de chile piquín con solución de sacarosa y demostraron que la oleorresina se adsorbió en la muestra a 1.19 g de aceite (100 g^{-1} en base seca). Salazar-López *et al.* (2016) enriquecieron anillos de piña con emulsión de oleorresina de chile piquín usando solución de sacarosa y lograron impregnar 800 μg de carotenoides (100 g^{-1} fruta).

En este estudio, la mayor impregnación de piperina en tejido de chayote fue de 5410.6 ± 88.2 mg piperina (100 g^{-1} en base seca), utilizando GA como material de pared, 420 min de procesamiento y sin diferencias significativas en la concentración de etanol en la emulsión. La piperina se ha relacionado con propiedades antiinflamatorias, analgésicas, antioxidantes y antimicrobianas (Hou *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019; Quilaqueo *et al.*, 2019).

La Figura 3-7 es un conjunto de micrográficas SEM de la superficie de rodajas de chayote osmodeshidratado en solución osmótica con emulsión a 35 °C durante 420 min. Las micrográficas

corresponden a tejido de chayote fresco (Figura 3-7a), una muestra osmodeshidratada en solución osmótica con emulsión con WPC (Figura 3-7b) y una muestra osmodeshidratada en solución osmótica con emulsión con GA (Figura 3-7c).

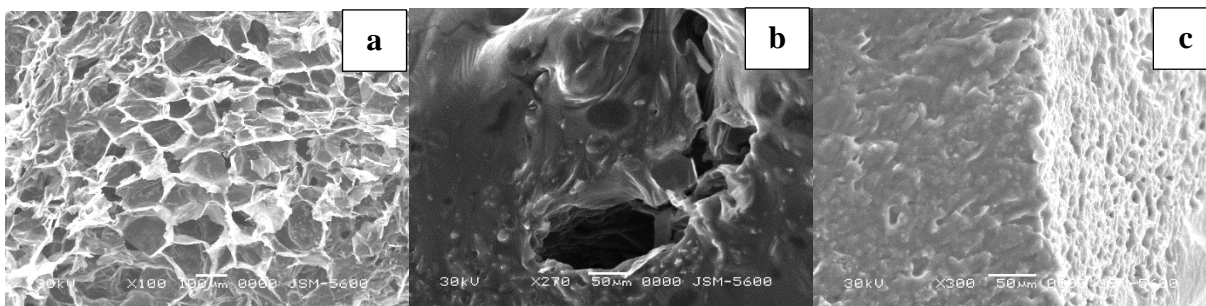


Figura 3-7. Micrografía SEM de la superficie del chayote. (a) Muestra de control sin tratamiento osmótico. (b) Chayote osmodeshidratado a 35 °C en solución de sacarosa con emulsión de WPC durante 420 min. (c) Chayote osmodeshidratado a 35 °C en solución de sacarosa con emulsión GA durante 420 min.

La Figura 3-7a muestra las células parenquimatosas del mesocarpio del chayote conectadas entre sí por la laminilla media. Estas células se encuentran en presión de turgencia y con espacios intercelulares heterogéneos de hasta 150 μm , los cuales pueden ser llenados por la solución osmótica. El chayote tratado con solución osmótica usando emulsión de WPC (Figura 3-7b) muestra acumulación de líquido en la superficie de la muestra, formando una capa densa de azúcar y WPC. Por el contrario, las muestras tratadas con solución osmótica utilizando emulsión de GA (Figura 3-7c) presentan microcápsulas de oleoresina embebidas en los capilares de la parte interna del tejido del chayote. Este aspecto también concuerda con el menor SG obtenido por proceso osmótico con emulsiones de WPC en comparación con el chayote tratado con emulsiones de GA.

3.4.6. Color

El color de las rodajas de chayote osmodeshidratadas está en función de los cambios químicos, biológicos y físicos que ocurren durante el procesamiento osmótico inducidos por la remoción de agua e impregnación de sólidos. Cadena Iñiguez *et al.* (2011) reportó que la epidermis de los frutos de chayote contiene pigmentos de clorofila a (Chl_a) y b (Chl_b); mientras que el mesocarpio del chayote contiene carotenoides (Loizzo *et al.*, 2016) que le otorgan color entre amarillo crema y verde pálido. En las rodajas frescas del fruto de chayote, los valores L^* , a^* y b^* fueron 74.34 ± 0.04 , -1.25 ± 0.09 y 10.48 ± 0.96 , respectivamente. Los efectos de la temperatura, tipo de

emulsificante y concentración de etanol en el cambio total de color (ΔE) del chayote osmodeshidratado se presentan en la Figura 3-8.

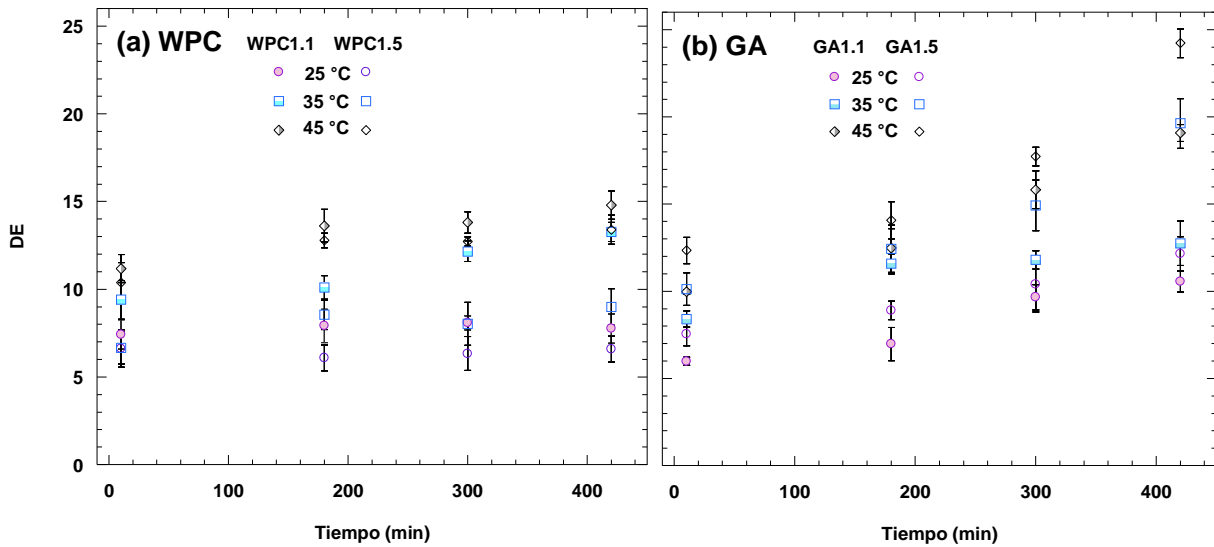


Figura 3-8. Cambio total de color (ΔE) en rodajas de chayote osmodeshidratadas utilizando solución osmótica con emulsiones de concentrado de proteína de suero (WPC) y goma arábiga (GA).

El ΔE en las rodajas de chayote osmodeshidratado puede atribuirse al aumento de la opacidad de las muestras debido a la contracción de su estructura, la concentración de la fase líquida y pigmentos presentes en el tejido celular (clorofilas y carotenoides), y a la impregnación de pigmentos presente en la solución osmótica. Akharume *et al.* (2018) osmodeshidrataron rodajas de manzana en soluciones de sacarosa con humo líquido refinado; ellos confirmaron que el color de las muestras puede deberse principalmente a pigmentos de coloración marrón (ácido fenólico) presentes en la solución osmótica.

3.5. CONCLUSIONES

Este estudio exploró el potencial de la deshidratación osmótica como método factible para incorporar ingredientes oleosos con propiedades funcionales y nutracéuticas encapsulados en emulsiones o/w en la matriz estructural en rodajas de chayote. Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que rodajas de chayote osmodeshidratado en solución de sacarosa con emulsión de oleorresina de pimienta negra preparada con goma arábiga, baja concentración de etanol (1.1) y procesados durante 420 min a 35 °C contenía 5410.6 ± 88.2 mg de piperina (100 g^{-1} en base

seca). Las rodajas de chayote osmodeshidratado presenta a_w de hasta 0.858, contenido de SST de hasta 92.66 °Bx y color más puro e intenso. Este producto con propiedades funcionales se podría utilizar como alimento de cocción rápida o ingrediente en ensaladas y sopas.

3.6. LITERATURA CITADA

- Abraão A. S., A. M. Lemos, A. Vilela, J. M. Sousa and F. M. Nunes (2013)** Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. *Food and Bioproducts Processing* 91:481-494, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.04.006>.
- Aguñiga- Sánchez I., M. Soto-Hernández, J. Cadena- Iñiguez, L. Ruíz-Posadas, J. D. Cadena-Zamudio, A. K. González-Ugarte, B. Weiss-Steider and E. Santiago-Osorio (2015)** Fruit Extract from A *Sechium edule* Hybrid Induce Apoptosis in Leukaemic Cell Lines but not in Normal Cells. *Nutrition and Cancer* 67:250-257, <https://doi.org/10.1080/01635581.2015.989370>.
- Aguirre-García M., P. Hernández-Carranza, O. Cortés-Zavaleta, H. Ruiz-Espinosa, C. E. Ochoa-Velasco and I. I. Ruíz-López (2020)** Mass transfer analysis of bioactive compounds in apple wedges impregnated with beetroot juice: A 3D modelling approach. *Journal of Food Engineering* 282:110003, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110003>.
- Akharume F., K. Singh, J. Jaczynski and L. Sivanandan (2018)** Microbial shelf stability assessment of osmotically dehydrated smoky apples. *LWT - Food Science and Technology*, 90:61–69. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.012>
- Assis F. R., R. M. S. C. Morais and A. M. M. B. Morais (2016)** Mathematical modelling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes. *Journal of Food Processing and Preservation* 41:e12895, <https://doi.org/10.1111/jfpp.12895>.
- Avendaño Arrazate C. H., J. Cadena-Iñiguez, M. L. Arévalo Galarza, E. Campos Rojas, V. M. Cisneros Solano and J. F. Aguirre Medina (2011)** Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. 1st ed., pp92. Colegio de Postgraduados. Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México A. C. México, DF.

- Azuara E., C. I. Beristain and G. F. Gutiérrez (1998)** A method for continuous kinetic evaluation of osmotic dehydration. *LWT-Food Science and Technology* 31:317–321, <http://dx.doi.org/10.1006/fstl.1997.0364>.
- Azuara E., R. Cortes, H. S. García and C. I. Beristain (1992)** Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology* 4:409–418, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb01206.x>.
- Bai L., S. Huan, J. Gu and D. J. McClements (2016)** Fabrication of oil-in-water nanoemulsions by dual-channel microfluidization using natural emulsifiers: Saponins, phospholipids, proteins, and polysaccharides. *Food Hydrocolloids* 61:703-711, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.035>.
- Bai L., S. Huan, Z. Li and D. J. McClements (2017)** Comparison of emulsifying properties of food-grade polysaccharides in oil-in-water emulsions: Gum arabic, beet pectin, and corn fiber gum. *Food Hydrocolloids* 66:144-153, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.019>.
- Batista de Medeiros R. A., E. V. da Silva Júnior, J. H. Fernandes da Silva, O. da Cunha Ferreira Neto, S. C. Rupert Brandão, Z. M. Pimenta Barros, O. R. Sá da Rocha and P. Moreira Azoubel (2019)** Effect of different grape residues polyphenols impregnation techniques in mango. *Journal of Food Engineering* 262:1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.011>.
- Bellary A. N., H. B. Sowbhagya and N. K. Rastogi (2011)** Osmotic dehydration assisted impregnation of curcuminoids in coconut slices. *Journal of Food Engineering* 105:453–459, doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.03.002.
- Bellary, A. N., and N. K. Rastogi (2014)** Effect of selected pretreatments on impregnation of curcuminoids and their influence on physico-chemical properties of raw banana slices. *Food and Bioprocess Technology* 7:2803–2812, <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1312-z>.
- Belyakova L. E., A. S. Antipova, M. G. Semenova, E. Dickinson, L. M. Merino and E. N. Tsapkina (2003)** Effect of sucrose on molecular and interaction parameters of sodium caseinate in aqueous solution: relationship to protein gelation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 31:31-/46, [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(03\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(03)00041-9).

- Blijdenstein T. B. J., F. D. Zoet, T. Van Vliet, E. Van der Linden and G. A. Van Aken (2004)** Dextran-induced depletion flocculation in oil-in-water emulsions in the presence of sucrose. *Food Hydrocolloids* 18:857–863, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.01.003>.
- Bouyer E., G. Mekhloufi, I. Potier, T. Kerdaniel, F. de du, J. L. Grossiord, V. Rosilio and F. Agnely (2011)** Stabilization mechanism of oil-in-water emulsions by β -lactoglobulin and gum Arabic. *J. Colloid Interface Sci.* 354:467-77, doi: 10.1016/j.jcis.2010.11.019.
- Cadena-Iñiguez J., L. Arévalo-Galarza, L. M. Ruíz-Posadas, J. F. Aguirre-Medina, M. Soto-Hernández, M. Luna-Cavazos and H. A. Zavaleta-Mancera (2006)** Quality evaluation and influence of 1-MCP on *Sechium edule* (Jacq.) Sw. fruit during postharvest. *Postharvest Biology and Technology* 40:170–176, doi:10.1016/j.postharvbio.2005.12.013.
- Chaguri L., M. S. Sanchez, V. P. Flammia and C. C. Tadini (2016)** Green banana (*Musa cavendishii*) osmotic dehydration by non-caloric solutions: modeling, physical-chemical properties, color, and texture. *Food and Bioprocess Technology* 10:615-629, <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1839-2>.
- Chanamai R. and D. J. McClements (2001)** Depletion flocculation of beverage emulsions
- Crank J. (1975)** The Mathematics of Diffusion, 2a ed.
- De Mello Júnior R. E., J. L. G. Gomes Corrêa, F. José Lopes, A. Umbelina de Souza and K. C. Ribeiro da Silva (2019)** Kinetics of the pulsed vacuum osmotic dehydration of green fig (*Ficus carica L.*). *Heat and Mass Transfer* 55:1685-1691, <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02559-w>.
- Dermesonlouoglou E. K. and M. C. Giannakourou (2018)** Modelling dehydration of apricot in a non-conventional multi-component osmotic solution: effect on mass transfer kinetics and quality characteristics. *Journal of Food Science and Technology* 55:4079-4089, <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3334-4>.
- Diah Setiowati A., W. Wijaya and P. Van der Meeren (2020)** Whey protein polysaccharide conjugates obtained via dry heat treatment to improve the heat stability of whey protein stabilized emulsions. *Trends in Food Science & Technology* 98:150–161, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.011>.
- Díaz-de-Cerio E., V. Verardo, A. Fernández-Gutiérrez and A. M. Gómez-Caravaca (2019)** New insight into phenolic composition of chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.). *Food Chemistry* 295:514–519, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.146>.

- Du Q., J. Tang, M. Xu, F. Lyu, J. Zhang, Y. Qiu, J. Liu and Y. Ding (2021)** Whey protein and maltodextrin-stabilized oil-in-water emulsions: Effects of dextrose equivalent. *Food Chemistry* 2021:128094, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128094>.
- Emser K., J. Barbosa, P. Teixeira and A. M. M. Bernardo de Moraes (2017)** *Lactobacillus plantarum* survival during the osmotic dehydration and storage of probiotic cut apple. *Journal of Functional Foods* 38:519–528, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.021>.
- Euston S. R., S. R. Finnigan and R. L. Hirst (2000)** Aggregation kinetics of heated whey protein-stabilized emulsions. *Food Hydrocolloids* 14:155-161, [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(99\)00061-2](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(99)00061-2).
- Firdous S. M., S. Ahmed and S. Dey (2012)** Antiepileptic and central nervous system depressant activity of *Sechium edule* fruit extract. *Bangladesh Journal of Pharmacology* 7: 199-202, <https://doi.org/10.3329/bjp.v7i3.11275>.
- Flores-Andrade E., L. A. Pascual-Pineda, M. Jiménez and C. I. Beristain (2013)** Efecto de la proteína de suero de leche-sacarosa en la deshidratación osmótica de manzana. *Rev. Mexicana Ing. Química*, 12:415–424.
- Flores-Andrade E., Z. Allende-Baltazar, P. E. Sandoval-González, M. Jiménez-Fernández, C. I. Beristain and L. A. Pascual-Pineda (2021)** Carotenoid nanoemulsions stabilized by natural emulsifiers: Whey protein, gum Arabic, and soy lecithin. *Journal of Food Engineering* 290:110208, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110208>.
- Frías Tamayo J. A., G. Ramírez Peña, C. Paz Lorente, C. Herrero Pacheco y J. Acosta Campusano (2016)** *Sechium edule* (jacq) sw: Potencia fitoterapéutica como agente antibacteriano. *Medisur* 14:6.
- García M., R. Díaz, Y. Martínez and A. Casariego (2010)** Effects of chitosan coating on mass transfer during osmotic dehydration of papaya. *Food Research International* 43:1656–1660, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.002>.
- Giraldo G., P. Talens, P. Fito and A. Chiralt (2003)** Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering* 58:33-43, [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00331-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00331-X).
- Gomes Corrêa J. L., D. B. Ernesto and K. Soares de Mendonça (2016)** Pulsed vacuum osmotic dehydration of tomatoes: Sodium incorporation reduction and kinetics modeling. *LWT - Food Science and Technology* 71:17-24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.046>.

- González-Santos R., J. Cadena-Íñiguez, F. J. Morales-Flores, V. M. Ruíz-Vera and J. Pimentel-López (2016)** Prediction of the effects of climate change on *Sechium edule* (Jacq.) Swartz varietal groups in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution* 64:791-804, <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0401-4>.
- Haque M. A., P. Aldred, J. Chen, C. J. Barrow and B. Adhikari (2013)** Comparative study of denaturation of whey protein isolate (WPI) in convective air drying and isothermal heat treatment processes. *Food Chemistry* 141:702–711, doi: 10.1016/j.foodchem.2013.03.035.
- Harnsilawat T., R. Pongsawatmanit and D. J. McClements (2006)** Stabilization of Model Beverage Cloud Emulsions Using Protein-Polysaccharide Electrostatic Complexes Formed at the Oil-Water Interface. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54:5540-5547, <https://doi.org/10.1021/jf052860a>.
- Hinnenkamp C. and B. P. Ismail (2021)** A proteomics approach to characterizing limited hydrolysis of whey protein concentrate. *Food Chemistry*, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129235.
- Hou X. F., H. Pan, L. Xu, Q. B. Zha, X. He and D. Y. Ouyang (2015)** Piperine suppresses the expression of CXCL8 in lipopolysaccharide-activated SW480 and HT29 cells via downregulating the mitogen-activated protein kinase pathways. *Inflammation* 38:1093–1102, doi: 10.1007/s10753-014-0075-z.
- Hu D. H., Y. Wang, Z. W. Chen, Z. C. Ma, Q. You, X. X. Zhang and Y. Gao (2015)** The protective effect of piperine on dextran sulfate sodium induced inflammatory bowel disease and its relation with pregnane X receptor activation. *Journal of Ethnopharmacology* 169:109–123, doi: 10.1016/j.jep.2015.04.006.
- Hu J., H. Zheng, X. Chen, X. Li, Y. Xu and M. Xu (2020)** Synergetic effects of whey protein isolate and naringin on physical and oxidative stability of oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids* 101:105517, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105517>.
- Huerta-Vera, K., Flores-Andrade, E., Pérez-Sato, J. A., Morales-Ramos, V., Pascual-Pineda, L. A., & Contreras-Oliva, A. (2017).** Enrichment of banana with *Lactobacillus rhamnosus* using double emulsion and osmotic dehydration. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1053-1062. doi: 10.1007/s11947-017-1879-2
- Jiménez-Hernández, J., Estrada-Bahena, E. B., Maldonado-Astudillo, Y. I., Talavera-Mendoza, O., Arámbula-Villa, G., & Azuara, E. (2017).** Osmotic dehydration of mango

- with impregnation of inulin and piquin-pepper oleoresin. *LWT - Food Science and Technology*, 79, 609-615. doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.016
- Junqueira J. R. J., J. L. G. Corrêa, K. S. Mendonca, R. E. Mello Junior and A. U. Souza (2020)** Modeling mass transfer during osmotic dehydration of different vegetable structures under vacuum conditions. *Food Science and Technology*, <https://doi.org/10.1590/fst.02420>.
- Kontogiorgos V., S. M. Tosh and P. J. Wood (2009)** Phase behaviour of high molecular weight oat β -glucan/whey protein isolate binary mixtures. *Food Hydrocolloids* 23:949–956, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.07.005>.
- Li C., Y. Li, L. Zhang, S. Zhang, W. Yao and Z. Zuo (2019)** The protective effect of piperine on ovariectomy induced bone loss in female mice and its enhancement effect of osteogenic differentiation via Wnt/ β catenin signaling pathway. *Journal of Functional Foods* 58:138–150, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.04.048>.
- Lim T. (2012)** *Sechium edule*. Edible medicinal and non-medicinal plants (pp. 384–391).
- Loizzo M. R., M. Bonesi, F. Menichini, M. C. Tenuta, M. Leporini and R. Tundis (2016)** Antioxidant and carbohydrate-hydrolysing enzymes potential of *Sechium edule* (Jacq.) Swartz (Cucurbitaceae) peel, leaves and pulp fresh and processed. *Plant Foods for Human Nutrition* 71:381-387, <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0571-4>.
- McClements D. J. (2004)** Protein-stabilized emulsions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 9:305-313, <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2004.09.003>.
- Miranda Pinheiro R. M., W. P. da Silva, D. S. do A. Miranda, C. M. D. P. S. e Silva, T. Pessoa and M. S. de Medeiros (2017)** Description of osmotic dehydration of melon cubes using a three dimensional diffusion model: An algorithm to determine the effective diffusivity. *International Journal of Food Engineering* 13(12), <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0241>.
- Moraga M. J., G. Moraga and N. Martínez-Navarrete (2011)** Effect of the re-use of the osmotic solution on the stability of osmodehydro-refrigerated grapefruit. *LWT - Food Science and Technology* 44:35-41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2010.05.018>.
- Nisha P., R. S. Singhal and A. B. Pandit (2009)** The degradation kinetics of flavor in black pepper (*Piper nigrum* L.). *Journal of Food Engineering* 92:44–49, doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.10.018.

- Ozturk B., S. Argin, M. Ozilgen and D. J. McClements (2015)** Formation and stabilization of nanoemulsion-based vitamin E delivery systems using natural biopolymers: Whey protein isolate and gum arabic. *Food Chemistry* 188:256-263, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.005>.
- Peredo-Luna H. A. and M. T. Jiménez-Munguía (2012)** Mecanismos de inestabilidad y métodos de estabilización de emulsiones múltiples. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 2:122-130.
- Quilaqueo M., S. Millao, I. Luzardo-Ocampo, R. Campos-Vega, F. Acevedo, C. Shene and M. Rubilar (2019)** Inclusion of piperine in β -cyclodextrin complexes improves their bioaccessibility and *in vitro* antioxidant capacity. *Food Hydrocolloids* 91:143–152, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.011>.
- Recgarla N., M. Riaz, S. Ko and S. Park (2017)** Novel technologies to enhance solubility of food-derived bioactive compounds: A review. *Journal of Fuctional Foods* 39:63-73, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.10.001>.
- Ruiz-López I. I., H. Ruiz-Espinosa, E. Herman-Lara and G. Zárate-Castillo (2011)** Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (*Averno carambola* L.) in sugar solutions. *Journal of Food Engineering* 104:218–226, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.013>.
- Ruiz-López I. I., I. R. Huerta-Mora, M. A. Vivar-Vera, C. E. Martínez-Sánchez and E. Herman-Lara (2010)** Effect of osmotic dehydration on air-drying characteristics of chayote. *Drying Technology: An International Journal* 28:1201–1212, <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2010.482716>.
- Salazar-López E. I., M. Jiménez, R. Salazar and E. Azuara (2015)** Incorporation of microcapsules in pineapple intercellular tissue using osmotic dehydration and microencapsulation method. *Food Bioprocess Technol* 8:1699-1706, <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1534-8>.
- Schincariol Paes M., J. P. Ferreira Del Pintor, P. de Alcântara Pessoa Filho and C. C. Tadini (2019)** Mass transfer modeling during osmotic dehydration of cambuci (*Campomanesia phaea* (O. Berg) Landrum) slices and quality assessment. *Journal of Molecular Liquids* 273:408–413, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.040>.

- Setiowati A. D., W. Wijaya and P. V. Meeren (2020)** Whey protein-polysaccharide conjugates obtained via dry heat treatment to improve the heat stability of whey protein stabilized emulsions. *Trends in Food Science & Technology* 98:150–161, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.011>.
- Shafirany M. Z., Y. Susilawati, A. Muhtadi, T. Milanda and A. Y. Chaerunissa (2018)** Antihypertensive activities instant granul of combination extract roselle flower petals (*Hibiscus sabdariffa*L.), chayote fruit (*Sechium edule (Jacq.) Sw.*) and aloe vera leaves (*Aloe Vera L.*) in white male rats. *Research Journal of Chemistry and Enviroment* 22:58-65.
- Sharma M. and K. K. Dash (2019)** Effect of ultrasonic vacuum pretreatment on mass transfer kinetics during osmotic dehydration of black jamun fruit. *Ultrasonics - Sonochemistry* 58:104693, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104693>.
- Shukla A., R. S. Shukla, C. Das and V. V. Goud (2019)** Gingerols infusion and multi-step process optimization for enhancement of color, sensory and functional profiles of candied mango. *Food Chemistry* 300:125195, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125195>.
- SIAP (2016)** Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.gob.mx/>. Access 30 March 2021.
- Spyropoulos F., A. Portscht and I. T. Norton (2010)** Effect of sucrose on the phase and flow behaviour of polysaccharide/protein aqueous two-phase systems. *Food Hydrocolloids* 24:217–226, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.09.008>.
- Sunila E. S. and G. Kuttan (2004)** Immunomodulatory and antitumor activity of *Piper longum* Linn. and piperine. *Journal of Ethnopharmacology* 90:339–346, doi:10.1016/j.jep.2003.10.016.
- Vasbinder A. J., P. J. van Mil, A. Bot and K. G. de Kruif (2001)** Acid-induced gelation of heat-treated milk studied by diffusing wave spectroscopy. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 21:245–250, doi: 10.1016/s0927-7765(01)00177-1.
- Vázquez G., E. Alvarez and J. M. Navaza (1995)** Surface Tension of Alcohol + Water from 20 to 50 °C. *Journal of Chemical and Engineering Data* 40:611-614, <https://doi.org/10.1021/je00019a016>.
- Vicente J., L. J. Barreto Pereira, L. Pinto Heckert Bastos, M. Geraldo de Carvalho and E. E. Garcia-Rojas (2018)** Effect of xanthan gum or pectin addition on Sacha Inchi oil-

- inwater emulsions stabilized by ovalbumin or tween 80: Droplet size distribution, rheological behavior and stability. *Biological Macromolecules* 120:339-345, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.041>.
- Vieira E. F., O. Pinho, I. M. P. L. V. O. Ferreira and C. Deleure-Matos (2019)** Chayote (*Sechium edule*): A review of nutritional composition, bioactivities and potential applications. *Food Chemistry* 275:557-568, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.146>.
- Vieira G. S., L. M. Pereira and M. D. Hubinger (2011)** Optimisation of osmotic dehydration process of guavas by response surface methodology and desirability function. *International Journal of Food Science and Technology* 47:132-140, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02818.x>.
- Zeeb B., E. Herz, D. J. McClements and J. Weiss (2014)** Impact of alcohols on the formation and stability of protein-stabilized nanoemulsions. *Journal of Colloid and Interface Science* 433:196–203, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2014.07.034>.

CONCLUSIONES GENERALES

Las cinéticas de transferencia de masa en rodajas de chayote deshidratado osmóticamente en soluciones de sacarosa fueron afectadas por la concentración de la solución osmótica, la temperatura y el tiempo de procesamiento, mientras la aplicación de pulso de vacío tuvo menor influencia. Se encontró que la transferencia de masa en matrices vegetales está regulada de forma entrópica por la membrana semipermeable de las células vegetales; estas atraviesan 3 etapas en función del contenido de agua. El chayote osmodeshidratado en soluciones de sacarosa presentó a_w de hasta 0.846, contenido SST hasta 31.9°Bx y color más puro e intenso respecto al testigo.

Los modelos empíricos DR-Hill y Rational Model permitieron predecir la a_w y el contenido de SST de rodajas de chayote osmodeshidratado y podrían ser útiles en el diseño y optimización de un método de DO de chayote.

Las cinéticas de transferencia de masa de las rodajas de chayote osmodeshidratadas en solución osmótica con emulsiones fueron afectadas por el biopolímero emulsificante, cantidad de alcohol, tiempo de inmersión y temperatura de la DO. La estabilidad de las emulsiones durante el proceso osmótico permitió obtener chayote osmodeshidratado, mínimamente procesado e impregnado hasta con 5410.6 ± 88.2 mg piperina (100 g^{-1} en base seca), a_w de hasta 0.858, contenido de SST hasta 92.66°Bx y color más puro e intenso respecto al testigo. Este producto podría ser incluido en alimentos de cocción rápida, como ensaladas o mezclas de sopas.

La deshidratación osmótica juega un papel importante en el desarrollo de alimentos mínimamente procesados a partir de la impregnación de compuestos bioactivos que modifiquen sus propiedades funcionales, estructurales y nutricionales.