

**UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA**

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental

DOCTORADO EN CIENCIA DE ALIMENTOS



**Osmodeshidratación, impregnación al vacío y secado de manzanas utilizando jugos concentrados como agentes osmóticos: efecto de las variables de proceso sobre la transferencia de masa, incorporación de compuestos bioactivos y vida útil**

Tesis que, en cumplimiento parcial de los requisitos para obtener el grado de Doctor en Ciencia de Alimentos, es presentada por

M.I.Q. Julio Emmanuel González Pérez

Director: Dr. Aurelio López Malo Vigil



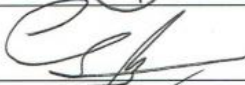
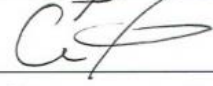

Santa Catarina Mártir, San Andrés Cholula, Puebla  
Primavera 2023

Nombre del estudiante: Julio Emmanuel González Pérez

ID: 164705

Nombre del director de tesis: Dr. Aurelio López Malo Vigil

Título de la tesis: "Osmodeshidratación, impregnación al vacío y secado de manzanas utilizando jugos concentrados como agentes osmóticos: efecto de las variables de proceso sobre la transferencia de masa, incorporación de compuestos bioactivos y vida útil"

Integrantes del Comité Doctoral	Firma
Dr. Aurelio López Malo Vigil	
Dra. Nelly Ramírez Corona	
Dr. José Ángel Guerrero Beltrán	
Dr. Aarón Romo Hernández	
Dra. María Elena Sosa Morales	

Los integrantes del Comité Doctoral expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de Doctorado en Ciencia de Alimentos anteriormente descrita, por lo que estamos de acuerdo en que se proceda a generar la versión definitiva de la tesis y programar el examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.

Fecha y hora de examen: miércoles 17 de mayo de 2023 a las 9:30 h

Lugar: Aula Magna de la Biblioteca

ÍNDICE

ÍNDICE .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
AGRADECIMIENTOS .....	XI
ESQUEMA DE LA TESIS .....	XII
RESUMEN.....	XV
<i>ABSTRACT</i> .....	XVI
<b>I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>III. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<i>Objetivo general</i> .....	13
<i>Objetivos específicos</i> .....	13
<b>1. CAPÍTULO 1.....</b>	<b>14</b>
<i>Resumen</i> .....	14
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Mecanismos de la deshidratación osmótica .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3.1 Factores de la matriz alimentaria .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3.2 Agente osmótico.....</b>	<b>23</b>
<b>1.3.3 Condiciones del proceso.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4 Métodos no térmicos aplicados en la deshidratación osmótica para modificar la transferencia de masa .....</b>	<b>27</b>
<b>1.4.1 Alta presión hidrostática .....</b>	<b>27</b>
<b>1.4.2 Pulsos de vacío .....</b>	<b>28</b>
<b>1.4.3 Pulsos eléctricos.....</b>	<b>32</b>
<b>1.4.4 Ultrasonidos y osmosonificación.....</b>	<b>35</b>
<b>1.5 Modelos y cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica</b>	<b>39</b>
<b>1.6 Conclusiones y comentarios finales.....</b>	<b>50</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>51</b>
<b>2. CAPÍTULO 2.....</b>	<b>67</b>
<i>Resumen</i> .....	67

<i>Aplicaciones prácticas</i> .....	<b>68</b>
<b>2.1</b> <b>Introducción</b> .....	68
<b>2.2</b> <b>Materiales y métodos</b> .....	71
2.2.1 <b>Materiales</b> .....	71
2.2.2 <b>Experimentos de osmodeshidratación</b> .....	71
2.2.3 <b>Análisis del encogimiento-deformación</b> .....	73
2.2.4 <b>Modelación de la transferencia de masa durante la osmodeshidratación</b> .....	74
2.2.5 <b>Análisis de datos</b> .....	80
<b>2.3</b> <b>Resultados y discusión</b> .....	81
2.3.1 <b>Actividad de agua y solidos solubles durante la osmodeshidratación</b> .....	81
2.3.2 <b>Encogimiento y deformación de cubos de manzana</b> .....	84
2.3.3 <b>Características de transferencia de masa de cubos de manzana</b> .....	90
<b>2.4</b> <b>Conclusiones</b> .....	101
<b>Referencias</b> .....	<b>102</b>
<b>3.  CAPÍTULO 3</b> .....	<b>113</b>
<i>Resumen</i> .....	<b>113</b>
<b>3.1</b> <b>Introducción</b> .....	114
<b>3.2</b> <b>Materiales y métodos</b> .....	116
3.2.1 <b>Materiales</b> .....	116
3.2.2 <b>Análisis fisicoquímico</b> .....	117
3.2.3 <b>Tratamiento de impregnación-deshidratación</b> .....	117
3.2.4 <b>Determinación de las propiedades de transferencia de masa</b> .....	118
3.2.5 <b>Análisis de imágenes</b> .....	118
3.2.6 <b>Características de color</b> .....	120
3.2.7 <b>Compuestos bioactivos</b> .....	121
3.2.8 <b>Observaciones de la microestructura</b> .....	123
3.2.9 <b>Análisis estadístico</b> .....	124
<b>3.3</b> <b>Resultados y discusión</b> .....	126
3.3.1 <b>Respuestas de la impregnación al vacío de la manzana según el diseño Box- Behnken</b> 126	
3.3.2 <b>Influencia de las variables del proceso en la actividad del agua, los sólidos solubles totales y los parámetros de transferencia de masa</b> .....	135
3.3.3 <b>Influencia de las variables del proceso en la impregnación del color y la contracción</b> .....	139

3.3.4	Influencia de las variables del proceso en los compuestos bioactivos .....	142
3.3.5	Influencia de las variables del proceso en los parámetros de color .....	144
3.4	Conclusiones .....	147
Referencias.....		148
<b>4. CAPÍTULO 4.....</b>		<b>156</b>
<i>Resumen</i> .....		156
4.1	Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2	Materiales y métodos .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.1	Materiales.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.2	Tratamiento de impregnación con vacío .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.3	Secado por liofilización .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.4	Almacenamiento bajo condiciones aceleradas.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.5	Carotenoides totales .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.6	Textura .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.7	Parámetros de color .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.8	Evaluación sensorial.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.9	Predicción del tiempo de falla .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.10	Análisis estadístico.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3	Resultados y discusión .....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1	Impregnación de tejido .....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2	Parámetros de transferencia de masa del proceso de impregnación.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.3	Evaluación sensorial del proceso de impregnación .	¡Error! Marcador no definido.
4.3.4	Carotenoides totales .....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.5	Parámetros de color del proceso de impregnación..	¡Error! Marcador no definido.
4.3.6	Análisis de componentes principales de proceso de impregnación.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.7	Procedimiento de liofilización .....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.8	Predicción de vida útil mediante modelo de tiempo de falla ..	¡Error! Marcador no definido.
4.4	Conclusiones .....	¡Error! Marcador no definido.
Referencias.....		¡Error! Marcador no definido.
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES .....</b>		<b>158</b>
<b>EVIDENCIA DE PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS Y PUBLICACIONES .....</b>		<b>160</b>

<b>Congresos</b> .....	160
<i>Presentaciones en modalidad oral</i> .....	160
<i>Presentación en modalidad póster</i> .....	166
<i>Futuras presentaciones en congresos</i> .....	179
<i>Presentaciones en congresos durante el doctorado</i> .....	183
<b>Publicaciones en memorias</b> .....	213
<b>Publicaciones en revistas</b> .....	218
<b>Publicaciones en proceso</b> .....	229
<b>Publicaciones durante el doctorado</b> .....	231

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.1 Transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica de frutas u hortalizas. Adaptado de Toupin et al. [116].	17
Figura 1.4.1 Representación esquemática de la reducción mecánica del volumen para generar una alta presión hidrostática. Adaptado de [128].	27
Figura 1.4.2 Representación esquemática del sistema de procesamiento de alimentos sólidos con pulsos eléctricos. Adaptado de [90].	32
Figura 1.4.3 Representación esquemática del sistema de tratamiento de osmosonificación de alimentos y del colapso asimétrico de las burbujas de vapor provocado por los ultrasonidos. Adaptado de [71].	36
Figura 1.5.1 Evolución experimental (puntos) y ajustado (líneas) evolución de deshidratación e impregnación de cubos de pera osmodeshidratados con concentrado de uva (a 50 °Brix, 10 g de solución osmótica / g de producto y 40 °C).	45
Figura 2.3.1 Actividad de agua de los cubos de manzana (puntos vacíos) y de las soluciones osmóticas (puntos sólidos) durante la deshidratación osmótica con diferentes medios osmóticos a 40 °C. (a) sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana.	82
Figura 2.3.2 Evolución del estado medido (puntos) y del estado estimado (líneas) de la concentración total de sólidos solubles durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando (a) soluciones de sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana a 40 °C. Línea continua, resultado del observador para $\lambda = -0.4$ .	83
Figura 2.3.3 Evolución experimental (puntos) y ajustada (línea) de la longitud característica adimensional de los cubos de manzana durante el proceso de deshidratación osmótica en diferentes medios a 40 °C. (a) sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana.	85
Figura 2.3.4 Deformación promedio de los cubos de manzana durante el proceso de deshidratación osmótica utilizando soluciones de sacarosa a 40 °C.	86
Figura 2.3.5 Deformación promedio de los cubos de manzana durante el proceso de deshidratación osmótica utilizando jugo concentrado de manzana a 40 °C.	86
Figura 2.3.6 Aspecto general de la manzana fresca y osmodeshidratada en equilibrio con soluciones de sacarosa y jugo concentrado de manzana.	88
Figura 2.3.7 Evolución de la pérdida de agua experimental (puntos) y simulada (líneas) durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando (a) soluciones de sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana a 40 °C. Línea continua, modelo con contracción y línea.	92
Figura 2.3.8 Evolución de la ganancia de solutos experimental (puntos) y simulada (líneas) durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando (a) soluciones de sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana a 40 °C. Línea continua, modelo con contracción y líneas punteadas, modelo sin contracción.	93
Figura 2.3.9 Trayectorias estado-error predichas por el observador de Luenberger para diferentes valores de $\lambda$ y $\phi = 9e6$ durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando 40 °Brix de jugo concentrado de manzana a 40 °C. (a) Evolución de la concentración de sólidos solubles totales durante el tiempo de inmersión. (b) Comportamiento dinámico del parámetro específico de transferencia de solutos. (c) Optimización del valor propio.	99
Figura 2.3.10 Constante específica de la concentración de sólidos solubles totales frente a la difusividad del soluto durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando a. soluciones de sacarosa y b. jugo concentrado de manzana a 40 °C.	100
Figura 3.2.1 Pasos de procesamiento de imágenes para obtener el área de distribución de color del soluto impregnado: (a) imagen original, (b) imagen en escala de grises sin fondo, (c) perfil	

bidimensional de intensidad de píxeles de la imagen perfil bidimensional de intensidad (d) reducción del color a dos clústeres.....	120
<b>Figura 3.3.1 Efecto de la interacción tiempo-concentración en (a) los sólidos solubles totales (<math>SST = -22.13 + 0.031VP - 0.192t + 1.293C - 5.3E-5 VP^2 - 0.013C^2 + 0.007tC</math>), y de la interacción reducción de presión-tiempo en (b) la pérdida de agua (<math>WL = -0.43 - 1.4E-4VP + 0.007t + 0.018C - 1.4E-4t^2 - 1.4E-4C^2 + 6.0E-6VPt</math>), y (c) ganancia de solutos (<math>SG = 0.03 + 8.1E-5VP - 0.003t + 3.8E-4C + 6.7E-5t^2 + 2.0E-6VPt</math>) de los cubos de manzana impregnados con jugo de uva concentrado. Los puntos corresponden a los datos experimentales. ....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 3.3.2 Micrografía del tejido de manzana: (a) fresca, y (b) tejido impregnado a 300 mmHg durante 20 min y 50 °Brix de jugo concentrado de uva.....</b>	<b>139</b>
<b>Figura 3.3.3 Área de distribución del color del soluto impregnado en los cubos de manzana. Se consideran valores del perfil bidimensional de intensidad de píxel entre 80 y 255 como el color del soluto impregnado.....</b>	<b>140</b>
<b>Figura 3.3.4 Efecto de la interacción reducción de la presión-concentración de la solución osmótica sobre (a) actividad antioxidante (<math>AA = -134 - 0.126VP + 12.990t + 32.860C - 8.6E-4 VP^2 - 0.280t^2 - 0.337C^2 + 0.016VPC</math>), (b) compuestos fenólicos totales (<math>TPC = 1068.70 - 1.458VP - 28.48t - 3.4C + 0.485t^2 + 0.030VPt + 0.020VPC</math>), y (c) antocianinas monoméricas totales (<math>Mlv = 36.60 - 0.055VP - 0.701t - 0.203C + 1.3E-3VPt + 6.0E-4VPC + 0.012tC</math>) en cubos de manzana impregnados con jugo de uva concentrado durante 20 min de procesamiento. ....</b>	<b>144</b>
<b>Figura 3.3.5 Efecto de la interacción presión-reducción-tiempo sobre (a) <math>L^*</math> (<math>L^* = 62.43 - 0.056VP - 0.194t - 0.527C - 7.2E-5 VP^2 + 5.8E-4 VPt + 0.001VPC</math>), (b) <math>a^*</math> (<math>a^* = 11.76 + 0.037VP + 0.16t - 8.1E-5 VP^2 - 4.6E-4 VPt</math>), y (c) Matiz (<math>Hue^\circ = -21.97 - 0.113VP + 1.178t + 3.037C - 0.031 C^2 + 0.001 VPt + 0.001VPC - 0.032tC</math>) de cubos de manzana impregnados con jugo de uva concentrado. Los puntos corresponden a los datos experimentales. ....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 4.3.1 Tejido impregnado al utilizar jugo de zanahoria de distintas concentraciones en diferentes variedades de manzana. ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 4.3.2 Diagrama PCA <i>biplot</i> para algunos parámetros de calidad de manzanas impregnadas por vacío. Nota: TC, carotenoides totales; TCG, TC ganados; TI, impregnación de tejido; WR, reducción de peso; WL, pérdida de agua; TSS, sólidos solubles totales; Taste, sabor; <math>\Delta E</math>, diferencia neta de color; <math>Hue^\circ</math>, matiz; Moisture, humedad; YI, índice de amarillo. 1-4, <i>Red Delicious</i>; 5-8, <i>Pink Lady</i>; 9-12, <i>Ambrosía Gold</i>; 13-16, <i>WA 38</i>; 17-20, <i>Royal Gala</i>; 21-24, <i>Golden Delicious</i>; 25-28, <i>Granny Smith</i> para las concentraciones 20 a 50 °Brix, respectivamente. ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 4.3.3 Tiempo de falla para la (a) dureza y (b) actividad de agua de manzana liofilizada previamente impregnada y almacenada en polipropileno a diferentes combinaciones de temperatura (T) y humedad relativa (RH). ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 4.3.4 Tiempo de falla para la diferencia neta de color de manzana liofilizada previamente impregnada y almacenada en bolsa de (a) polipropileno y (b) metalizada a diferentes combinaciones de temperatura (T) y humedad relativa (RH).....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 4.3.5 Tiempo de falla para los carotenoides totales de manzana liofilizada previamente impregnada y almacenada en bolsa de (a) polipropileno y (b) metalizada a diferentes combinaciones de temperatura (T) y humedad relativa (RH).....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.3.1 Efecto de la porosidad en el grado de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas con diferente porosidad. ....	18
Tabla 1.3.2 Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas.....	19
Tabla 1.4.1 Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistida por alta presión hidrostática. ....	30
Tabla 1.4.2 Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por campo eléctrico pulsado. ....	34
Tabla 1.4.3 Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por osmosonificación o ultrasonido.....	37
Tabla 1.5.1 Modelos matemáticos usados para describir la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas.....	40
Tabla 1.5.2 Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a un proceso de deshidratación osmótica asistida por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmosonificación.....	47
Tabla 2.3.1 Parámetros de contracción de cubos de manzana durante la deshidratación osmótica.....	86
Tabla 2.3.2 Parámetros de color de la manzana osmodeshidratada en equilibrio con soluciones de sacarosa y jugo concentrado. ....	89
Tabla 2.3.3 Parámetros del modelo de Azuara durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana. ....	91
Tabla 2.3.4 Coeficientes de difusividad estimados durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana. ....	96
Tabla 2.3.5 Resumen de los coeficientes de difusividad estimados durante la deshidratación osmótica de frutas y verduras con soluciones de frutas y soluciones de sacarosa. ....	97
Tabla 2.3.6 Parámetros de ajuste y error del estimador basado en el observador de Luenberger para $\lambda = -0.4$ durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana.....	100
Tabla 3.2.1 Diseño experimental Box-Behnken con valor real o codificado (número entre paréntesis: -1, nivel bajo; 0, nivel medio o 1, nivel alto) para la impregnación de manzanas. ....	126
Tabla 3.3.1 Resultados del diseño experimental para la actividad del agua ( $a_w$ ), los sólidos solubles totales (TSS, °Brix) y los parámetros de transferencia de masa de la impregnación de cubos de manzana con soluciones de diferentes concentraciones.....	127
Tabla 3.3.2 Resultados del diseño experimental para los parámetros de color de los cubos de manzana impregnados con soluciones. ....	128
Tabla 3.3.3 Resultados del diseño experimental para el volumen adimensional ( $V/V_0$ ), el área de distribución del color del soluto impregnado ( $A_u/A_{OP}$ ) y las características antioxidantes de los cubos de manzana impregnados con soluciones. ....	129
Tabla 3.3.4 Coeficientes de regresión del modelo de diseño Box-Behnken.....	130
Tabla 4.2.1 Características fisicoquímica de diferentes variedades de manzanas..... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 4.3.1 Resumen de los valores de actividad de agua ( $a_w$ ), sólidos solubles totales (TSS), parámetros de transferencia de masa (WL / SG), carotenoides totales, tejido impregnado (TI) y sabor (Taste) de algunas variedades de manzana impregnadas con diferentes concentraciones de jugo de zanahoria (C en °Brix). .... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 4.3.2 Resumen de los parámetros de color, croma ( $C^*$ ), matiz (Hue°), índice de amarillo (YI) y diferencia neta de color ( $\Delta E$ ) de algunas variedades de manzana impregnadas con diferentes concentraciones de jugo de zanahoria (C). .... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 4.3.3 Evaluación sensorial de manzana impregnada con jugo de zanahoria, liofilizada y almacenada por 105 días en bolsas metalizadas. .... ¡Error! Marcador no definido.	

## AGRADECIMIENTOS

Primero y, ante todo, agradezco a Dios por la salud y la fortaleza que me brindó para llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero otorgado a través del programa de becas para estudios de posgrado, lo cual me permitió llevar a cabo este trabajo de investigación.

A la empresa *Kerr by Ingredion*, por la donación de los jugos concentrados de manzana y zanahoria utilizados en esta investigación, lo cual permitió la realización de algunos experimentos y la obtención de resultados valiosos.

Al **Dr. Aurelio López- Malo**, mi director de tesis, por su amistad, orientación, apoyo, por todas las revisiones de artículos, artículos de revisión, artículos de difusión, resúmenes para congreso, memorias, carteles, presentaciones y dedicación a lo largo de todo el proceso de investigación, así como por su generosidad al gestionar el financiamiento para las presentaciones en congresos nacionales e internacionales, lo cual me permitió compartir los resultados de este trabajo con la comunidad científica.

A la **Dra. Ramírez-Corona**, por su amistad, solución de dudas, revisión de diversos productos de tesis, por gestionar el apoyo financiero para la presentación de algunos trabajos en algunos congresos nacionales, lo cual me permitió adquirir nuevas habilidades y conocimientos en mi área de investigación.

Al **Dr. Jiménez-González** por su amistad, apoyo emocional, revisión y apoyo en algunos resultados experimentales que permitieron mejorar algunas presentaciones y publicaciones científicas.

Al **Dr. Guerrero-Beltrán** por su amistad, por motivarme para mejorar como investigador y ayudarme a mejorar mi escritura de artículos científicos.

A la **Dra. Jiménez-Munguía** por todas sus revisiones y correcciones de algunos productos de tesis. Asimismo, le agradezco todo el apoyo brindado para la realización experimental y escritura de esta tesis.

Al **Dr. Romo-Hernández** por su amistad, por las clases, revisiones y apoyo en la modelación de algunos resultados experimentales que permitieron mejorar algunas publicaciones científicas.

A todos los miembros del comité de tesis, por sus valiosas sugerencias y comentarios, los cuales contribuyeron significativamente a mejorar la calidad de este trabajo.

A mi familia, por su amor, apoyo y paciencia durante todo el proceso de investigación, sin los cuales no habría sido posible llevar a cabo este proyecto.

A mis colegas **Recio-Cázares**, **García-Santiesteban** y **Metri-Ojeda** por su apoyo y amistad durante el doctorado.

A mis amigas(os) **Ríos-Corripio**, **Hernández-López**, **Aguirre-García**, **Aparicio-Ortuño**, **Sánchez-Gómez**, **Díaz-González** y **Samperio-Tomé** por su apoyo y ánimo en todo momento.

A todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron al éxito de este proyecto, muchas gracias.

## ESQUEMA DE LA TESIS

Esta tesis doctoral está organizada en cuatro capítulos autónomos. El primer capítulo comienza con una revisión del efecto de los métodos térmicos y no térmicos en la transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a osmodeshidratación. Este permite introducir a las generalidades de la osmodeshidratación como principales parámetros de proceso, agentes osmóticos comunes, pretratamientos usados para agilizar la transferencia de masa y los principales modelos usados para describir las cinéticas de proceso. En el capítulo 1 y 3 se utilizó jugo concentrado de uva *Victoria* como agente osmótico, y en el capítulo 2 se utilizaron sacarosa y jugo concentrado de manzana y en el capítulo 4 se utilizó jugo concentrado de zanahoria para osmodeshidratar manzana.

El capítulo 2 evalúa el efecto de la concentración de sacarosa y jugo concentrado de manzana en los parámetros de transferencia de masa durante la osmodeshidratación de manzana de la variedad *Granny Smith*. Dichos parámetros se evaluaron mediante tres diferentes modelos. El primer modelo (modelo de Azuara) permitió estimar los parámetros de equilibrio de transferencia de masa; el segundo modelo permitió estimar el coeficiente de difusividad efectiva de transferencia de agua y solutos considerando las variaciones de volumen durante el proceso; y un modelo basado en un estimador de estado (de Luenberger) que permitió estimar el dinamismo del coeficiente de transferencia de solutos impregnados en la manzana.

El capítulo 3 evaluó el efecto de la reducción de la presión, el tiempo de proceso y la concentración de jugo concentrado de uva *Victoria* en la calidad de manzana impregnada con vacío. Este se realizó usando una metodología de superficie de respuesta la cual permitió predecir parámetros de transferencia de masa, actividad de agua, compuestos bioactivos impregnados, tinción de tejido, encogimiento y parámetros de color de las muestras impregnadas.

En el capítulo 4 se modeló el tiempo de falla de la calidad de manzana liofilizada previamente impregnada con jugo concentrado de zanahoria.

## Capítulo 1

González-Pérez, J. E., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2021). Mass transfer during osmotic dehydration of fruits and vegetables: Process factors and non-thermal methods. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 344-374. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09276-3>

## Capítulos 2

González-Pérez, J. E., Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2022). Modeling mass transfer during osmodehydration of apple cubes with sucrose or apple juice concentrate solutions: Equilibrium estimation, diffusion model, and state observer-based approach. *Journal of Food Process Engineering*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14125>

## Capítulo 3

González-Pérez, J. E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Guerrero-Beltrán, J. A., & López-Malo, A. (2022). Vacuum impregnation on apples with grape juice concentrate: Effects of pressure, processing time, and juice concentration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102981>

## Capítulo 4

González-Pérez, J. E., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. Shelf-life prediction of carrot juice-impregnated apple subjected to freeze-drying: kinetic models and failure time models. *En proceso*.

La sección de “EVIDENCIA DE PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS Y PUBLICACIONES” contiene otros artículos que no forman parte de los capítulos pero que fueron publicados en revistas JCR-SCOPUS-CONAHCyT y desarrollados con los objetivos planteados en esta tesis:

**González-Pérez, J. E., & López-Malo, A. (2022).** Sensory evaluation of apple cubes (*Granny Smith* var.) impregnated with concentrated grape juice (*Victoria* var.) subjected to convection drying. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 9(54), 28-39.

[https://riiit.com.mx/apps/site/files\\_v2450/cubos\\_manzana\\_pue.\\_3\\_riiit\\_ene-feb\\_2022.pdf](https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/cubos_manzana_pue._3_riiit_ene-feb_2022.pdf)

**González-Pérez, J. E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2023). Use of a Response Surface Methodology to optimise vacuum impregnation of  $\beta$ -carotene from *Daucus carota* in *Pachyrhizus erosus*. *Sustainable Food Technology. The Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/D2FB00036A

**González-Pérez, J. E.,** Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. (2023). Modeling of Drying Kinetics of Fresh and Osmodehydrated Apples during Convective Drying. In L. R. Hernández, & M. A. S. Meneses (Eds.), *Technology, Science and Culture: A Global Vision, Volume IV*. Rijeka: IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.105162

**González-Pérez, J. E.,** Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (Enviado) Modelling of apple drying processes through thin-layer models and effective water diffusion: comparison of drying schemes for fresh, osmodehydrated, and vacuum-assisted osmodehydrated fruit

**González-Pérez, J. E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, Nelly & López-Malo, A. (Enviado) Osmosonication of apple in concentrated grape juice: evaluation of mass transfer rates and impregnation effectiveness.

**González-Pérez, J. E.,** Jian, S., Jiménez-González, O.; Zavala, V.M., Guerrero-Beltrán, J.A., Romo-Hernández, A.; Ramírez-Corona, N. López-Malo, A., & López-Malo, A. (En revision por los autores) Evaluation of osmodehydration and vacuum-assisted osmodehydration as pre-treatments during fruit drying process: the effect on drying rates, effective water diffusion and changes in product quality.

## RESUMEN

**González-Pérez Julio Emmanuel.** Universidad de las Américas Puebla. Mayo 2023. **Osmodeshidratación, impregnación al vacío y secado de manzanas utilizando jugos concentrados como agentes osmóticos: efecto de las variables de proceso sobre la transferencia de masa, incorporación de compuestos bioactivos y vida útil.** Director: López-Malo Aurelio.

Se realizó una revisión del uso de métodos térmicos y no térmicos (TNT) para modificar la transferencia de masa (MT) durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas. En esta se analizó la aplicación de la TNT para modificar la MT y se abordaron los principales modelos que describen estos procesos. También se analizó la incorporación de jugos concentrados en manzana. En la primera etapa se modelaron las curvas de proceso durante la osmodeshidratación de manzana usando soluciones de sacarosa y jugo de manzana con el modelo de Azuara, la segunda ley de Fick y un modelo de primer orden con un observador de Luenberger. Estos modelos permitieron predecir los parámetros de equilibrio de MT, los coeficientes de difusividad de agua y solutos, y la tasa específica de transferencia de solutos, respectivamente. En la siguiente etapa se utilizó jugo concentrado de uva *Victoria* para evaluar el efecto de la reducción de la presión, el tiempo de inmersión y la concentración de jugo de uva sobre los parámetros de impregnación utilizando una metodología de superficie de respuesta. Se desarrollaron ecuaciones polinómicas de segundo orden para describir el comportamiento de la pérdida de agua, los sólidos solubles totales, el color, la tinción de tejido, la actividad antioxidante y los compuestos bioactivos en el producto impregnado. Por último, se usó un modelo de tiempo de falla (TTFM) para predecir la vida útil (considerando como parámetros de calidad la textura,  $a_w$ , color y carotenoides totales) de manzana liofilizada previamente impregnada con jugo concentrado de zanahoria. Las metodologías propuestas permiten optimizar las condiciones de proceso para incrementar la incorporación de compuestos bioactivos provenientes de jugos concentrados y además permite predecir las condiciones óptimas de almacenamiento requeridas para incrementar la vida útil.

## ***ABSTRACT***

A review was conducted on the use of thermal and non-thermal methods (TNT) to modify mass transfer (MT) during the osmotic dehydration of fruits and vegetables. The application of TNT to modify MT was analyzed, and the main models describing these processes were addressed. Concentrated apple juice incorporation was also investigated. In the first stage, process curves during apple osmo-dehydration using sucrose solutions and apple juice were modeled with Azuara's model, Fick's second law, and a first-order model with a Luenberger observer. These models allowed predicting MT equilibrium parameters, water and solute diffusivity coefficients, and specific solute transfer rates. In the next stage, using a response surface methodology, concentrated *Victoria* grape juice was used to evaluate the effect of pressure reduction, immersion time, and grape juice concentration on impregnation parameters. Second-order polynomial equations were developed to describe the behavior of water loss, total soluble solids, color, tissue staining, antioxidant activity, and bioactive compounds in the impregnated product. Finally, a time-to-failure model (TTFM) was used to predict the shelf life (considering texture,  $a_w$ , color, and total carotenoids as quality parameters) of freeze-dried apples previously impregnated with concentrated carrot juice. The proposed methodologies allow for optimizing process conditions to increase the incorporation of bioactive compounds from concentrated juices and predict the optimal storage conditions required to increase shelf life.

### I INTRODUCCIÓN

Las tendencias actuales de consumo buscan que los alimentos procesados sean más parecidos a sus contrapartes naturales, más saludables y nutritivos (Chitrakar *et al.*, 2019; Kowalska *et al.*, 2018). Las frutas son un claro ejemplo de alimentos con dichas características (Deng *et al.*, 2019). No obstante, tienen una vida de anaquel relativamente corta debido a cambios bioquímicos y microbiológicos generados principalmente por su alto contenido de humedad (Chitrakar, Zhang y Adhikari, 2019); para prolongar su vida útil se han sometido a procesos de deshidratación ya que, disminuir la humedad y actividad de agua, permite preservar productos por largos periodos de almacenamiento (Barbosa de Lima *et al.*, 2016).

Los principales métodos de deshidratación involucran tratamientos térmicos, como el secado convectivo, electrodinámico, por microondas, solar, entre otros (González-Pérez *et al.*, 2019). Sin embargo, con la aplicación de estos tratamientos, el valor nutricional de los productos secos disminuye por la pérdida de nutrientes termosensibles y las características sensoriales cambian debido a reacciones químicas o enzimáticas que afectan a la aceptación de las frutas secas, lo cual es un parámetro negativo de calidad (Qiu, 2019).

Algunos estudios implementan el uso de deshidratación osmótica como un pretratamiento para reducir el contenido de humedad y enriquecer a la matriz alimenticia con solutos (provenientes de una solución hipertónica) que permitan mejorar la composición nutricional, reducir la modificación morfométrica y mantener o modificar el color (Dermesonlouoglou *et al.*, 2017; González-Pérez *et al.*, 2019). La incorporación de estos solutos se da gracias a la presión osmótica ejercida por la diferencia de concentraciones entre la matriz alimenticia y la solución osmótica. La elección del tipo de solución osmótica depende principalmente de la compatibilidad con la matriz; para hortalizas, carnes rojas, pescado, camarón, entre otros se usan soluciones hipertónicas de sales (NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub>, entre otros), mientras que, para algunas hortalizas dulces y frutas se suele usar soluciones de sacarosa, jarabes, mezclas de edulcorantes o concentrados de jugos naturales de frutas u hortalizas (González-Pérez, Ramírez-Corona y López-Malo, 2021).



Recientemente, el uso de jugos concentrados de jugos de frutas u hortalizas como agente osmótico ha aumentado, ya que permite reducir el contenido de humedad, aportar compuestos bioactivos e incrementar el valor nutricional de la matriz osmodeshidratada (González-Pérez *et al.*, 2021; Lech *et al.*, 2018).

A pesar de los buenos resultados que se obtienen en alimentos osmodeshidratados, la transferencia de masa durante el proceso es lenta, lo que prolonga el tiempo de proceso (González-Pérez y López-Malo, 2022). Además, una de las principales problemáticas que surgen durante procesos de impregnación de solutos durante la deshidratación osmótica es que los solutos tienden a acumularse sobre la superficie externa del producto limitando la pérdida de agua e impidiendo la impregnación de solutos en la parte interior del producto (González-Pérez *et al.* 2022). Este tipo de impregnación se le conoce como impregnación heterogénea (Martínez-Vera y Vizcarra-Mendoza, 2022).

La actividad de agua de alimentos impregnados y osmodeshidratados es relativamente alta, por lo que requieren de un proceso de secado para incrementar la vida útil del producto (González-Pérez *et al.*, 2021). El secado de productos con impregnación heterogénea puede dar lugar al "*case hardening*". Este se produce cuando la capa exterior del producto se seca más rápidamente que las capas interiores, formando una capa dura e impermeable en la superficie. Esta capa puede atrapar la humedad en el interior, impidiendo que salga, lo que puede provocar un secado desigual y el crecimiento de mohos y bacterias (Gulati y Datta, 2015). Para evitar el *case hardening*, es importante asegurarse de que el proceso de secado se lleva a cabo lenta y uniformemente, con suficiente flujo de aire y control de la humedad. Además, el pretratamiento del producto también puede ayudar a prevenir el endurecimiento. Por ejemplo, escaldar o hervir las frutas y verduras antes del secado puede ayudar a romper las capas externas y mejorar la eliminación de la humedad durante el secado (Ae *et al.*, 2016; Fernando *et al.*, 2008).

Una alternativa para evitar la impregnación heterogénea es usar métodos térmicos con el fin de incrementar la permeabilidad de la membrana celular del producto y agilizar el transporte de masa. Sin embargo, el incremento de la temperatura puede afectar negativamente a la calidad. Por lo que se han aplicado pretratamientos no térmicos como pulsos de vacío, ultrasonido y altas presiones hidrostáticas con el fin de incrementar la

presión del sistema, aumentar la permeabilidad de la membrana celular de la matriz alimenticia, favorecer la transferencia de masa del agente osmótico e incorporar compuestos de manera homogénea (González-Pérez *et al.*, 2021; Yılmaz y Ersus Bilek, 2018).

Es importante monitorear los efectos que tienen diferentes variables de proceso (secado y pretratamiento de impregnación) en las características de calidad del producto. Desconocer los cambios ocurridos durante los procesos de transferencia de masa y energía, es una de las principales limitantes para disminución de costos de proceso, optimización de tiempos o la reducción de actividad de agua, mantener la composición nutricional e incrementar el tiempo de almacenamiento a condiciones ambientales (González-Pérez *et al.*, 2021; Martínez-Vera y Vizcarra-Mendoza, 2022).

Para monitorear procesos de secado y osmodeshidratación de frutas se ha hecho uso de modelos empíricos que permiten estimar el estado de equilibrio de transferencia de masa, modelos difusivos que permiten describir matemáticamente las curvas de proceso o el uso de modelos estadísticos que ayuden a predecir las características de un producto mediante la variación de las condiciones de proceso.

Por tal motivo, el interés de este trabajo de tesis fue describir matemáticamente las curvas y parámetros de proceso de deshidratación de manzana utilizando concentrados de frutas y hortalizas.

### REFERENCIAS

- Ae, L., Mg, G., Ti, L., & Es, L. (2016). Kinetic Study of the Osmotic Pretreatment and Quality Evaluation of Traditional Greek Candied Pumpkin. *Food & Nutrition Journal*, 1(1). doi: 10.29011/2575-7091.100005
- Alam, Md. S., Kaur, M., & Ramya, H. G. (2019). Mass transfer kinetics for osmotic dehydration of kinnow fruit in sugar solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89(1), 361–370. doi: 10.1007/s40011-017-0951-z

- Allahdad, Z., Nasiri, M., Varidi, M., & Varidi, M. J. (2019). Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, *244*, 202–211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T., & Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, *36*, 286–300. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.12.007
- Azuara, E., Beristain, C., & García, H. S. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food Science and Technology*, *29*(4), 239–242.
- Barbosa de Lima, A. G., da Silva, J. V., Pereira, E. M. A., dos Santos, I. B., & de Lima, W. M. P. B. (2016). Drying of bioproducts: Quality and energy aspects. En J. M. P. Q. Delgado & A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (Vol. 63, pp. 1–18). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-19767-8\_1
- Bera, D., & Roy, L. (2015). Osmotic dehydration of litchi using sucrose solution: Effect of mass transfer. *Journal of Food Processing & Technology*, *06*(07). doi: 10.4172/2157-7110.1000462
- Bozkir, H., Rayman Ergün, A., Serdar, E., Metin, G., & Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, *54*, 135–141. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
- Brochier, B., Marczak, L. D. F., & Noreña, C. P. Z. (2015). Osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes: Water effective diffusivity evaluation. *Food and Bioprocess Technology*, *8*(3), 623–636. doi: 10.1007/s11947-014-1432-5
- Calín-Sánchez, Á., Kharaghani, A., Lech, K., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Tsotsas, E. (2015). Drying Kinetics and Microstructural and Sensory Properties of Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as Affected by Drying Method. *Food and Bioprocess Technology*, *8*(1), 63–74. doi: 10.1007/s11947-014-1383-x
- Cano-Lamadrid, M., Lech, K., Michalska, A., Wasilewska, M., Figiel, A., Wojdyło, A., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment

- and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar Mollar de Elche. *Food Chemistry*, 232, 306–315. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.033
- Chitrakar, B., Zhang, M., & Adhikari, B. (2019). Dehydrated foods: Are they microbiologically safe? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2734–2745. doi: 10.1080/10408398.2018.1466265
- 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
- Cortez-Latorre, J. D., Faicán, M., Pirovani, M., & Piagentini, A. (2021). Improving fresh-cut apple quality and healthy potential-related attributes through mild vacuum impregnation process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(12), e15995. doi: 10.1111/jfpp.15995
- de Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., de Mendonça, K. S., Resende, N. S., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2017). Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 10–18. doi: 10.1016/j.ifset.2017.01.006
- Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., ... Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(9), 1408–1432. doi: 10.1080/10408398.2017.1409192
- Dermesonlouoglou, E. K., Bimpilas, A., Andreou, V., Katsaros, G. J., Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2017). Process optimization and kinetic modeling of quality of fresh-cut strawberry cubes pretreated by high pressure and osmosis: High pressure and osmotic treatment of strawberries for shelf life extension. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), 1–14. doi: 10.1111/jfpp.13137
- Dermesonlouoglou, E. K., & Giannakourou, M. C. (2019). Evaluation and modelling of osmotic pre-treatment of peach using alternative agents in a multiple-component solution: Modelling osmotic pre-treatment of peach. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1240–1249. doi: 10.1002/jsfa.9296

- Derrickson-Tharrington, E., Kendall, P. A., & Sofos, J. N. (2005). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 during storage or drying of apple slices pretreated with acidic solutions. *International Journal of Food Microbiology*, 99(1), 79–89. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.07.015
- Dias da Silva, G., Barros, Z. M. P., de Medeiros, R. A. B., de Carvalho, C. B. O., Rupert Brandão, S. C., & Azoubel, P. M. (2016). Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *LWT*, 74, 114–119. doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.039
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L., & Xidieh Murr, F. E. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya L.*). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 267–274. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.016
- Faicán, M. A., Piagentini, A., Pirovani, M. É., Faicán, M. A., Piagentini, A., & Pirovani, M. É. (2022). Vacuum impregnation of fresh-cut apples with osmotic solutions containing honey. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 75(3), 10089–10100. doi: 10.15446/rfnam.v75n3.99558
- Fernando, W. J. N., Ahmad, A. L., Shukor, S. R. A., & Lok, Y. H. (2008). A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *Journal of Food Engineering*, 88(2), 229–238. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.02.008
- García-Noguera, J., Oliveira, F. I. P., Weller, C. L., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2014). Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of freeze dried strawberries. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2222–2227. doi: 10.1007/s13197-012-0724-x
- González-Pérez, J.E., & López-Malo, A. (2022). Sensory evaluation of apple cubes (Granny Smith var.) impregnated with concentrated grape juice (Victoria var.) subjected to convection drying. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 9(54), 28–39.
- González-Pérez, J.E., López-Méndez, E. M., Luna-Guevara, J. J., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-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

- González-Pérez, J.E., López-Méndez, E. M., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-López, I. I. (2019). Mass transfer and morphometric characteristics of fresh and osmodehydrated white mushroom pilei during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 262, 181–188. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.06.017
- González-Pérez, J.E., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2021). Mass transfer during osmotic dehydration of fruits and vegetables: Process factors and non-thermal methods. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 344–374. doi: 10.1007/s12393-020-09276-3
- González-Pérez, Julio E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Guerrero-Beltrán, J. A., & López-Malo, A. (2022). Vacuum impregnation on apples with grape juice concentrate: Effects of pressure, processing time, and juice concentration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102981. doi: 10.1016/j.ifset.2022.102981
- Gulati, T., & Datta, A. K. (2015). Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, 166, 119–138. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031
- Kek, S. P., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2013). Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 495–506. doi: 10.1016/j.fbp.2013.05.003
- Kowalska, H., Marzec, A., Kowalska, J., Cieurzyńska, A., Czajkowska, K., Cichowska, J., ... Lenart, A. (2017). Osmotic dehydration of Honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 500–505. doi: 10.1016/j.lwt.2017.03.044
- Kowalska, J., Kowalska, H., Marzec, A., Brzeziński, T., Samborska, K., & Lenart, A. (2018). Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 799–807. doi: 10.1007/s10068-018-0304-6
- Lech, K., Figiel, A., Michalska, A., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2018). The effect of selected fruit juice concentrates used as osmotic agents on the drying kinetics and chemical properties of vacuum-microwave drying of pumpkin. *Journal of Food Quality*, 2018, 1–11. doi: 10.1155/2018/7293932

- Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M., & Szarycz, M. (2015). Drying Kinetics and Bioactivity of Beetroot Slices Pretreated in Concentrated Chokeberry Juice and Dried with Vacuum Microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644–1653. doi: 10.1080/07373937.2015.1075209
- Luchese, C. L., Gurak, P. D., & Marczak, L. D. F. (2015). Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): Evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 1128–1136. doi: 10.1016/j.lwt.2015.04.060
- Martínez-Vera, C., & Vizcarra-Mendoza, M. G. (2022). Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach. *Biosystems Engineering*, 218, 256–273. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.04.016
- Mokhtarian, M., Heydari Majd, M., Koushki, F., Bakhshabadi, H., Daraei Garmakhany, A., & Rashidzadeh, S. (2014). Optimization of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 6(2), 201–214. doi: 10.3920/QAS2012.0121
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E., & Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation properties of some fruits at vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*, 56(4), 307–314. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00155-3
- Muñiz-Becerá, S., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2017). Solute transfer in osmotic dehydration of vegetable foods: A review: solute transfer in osmotic dehydration. *Journal of Food Science*, 82(10), 2251–2259. doi: 10.1111/1750-3841.13857
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Tappi, S., Siroli, L., Lanciotti, R., Romani, S., & Witrowa-Rajchert, D. (2018). Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): Study on quality parameters evolution during storage. *Food Control*, 93, 40–47. doi: 10.1016/j.foodcont.2018.05.005
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K., & Figiel, A. (2015a). Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried sour cherry fruits pre-dehydrated

- in fruit concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 8(10), 2076–2095. doi: 10.1007/s11947-015-1561-5
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K., & Figiel, A. (2015b). Influence of osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 824–836. doi: 10.1007/s11947-014-1447-y
- Osae, R., Zhou, C., Xu, B., Tchabo, W., Tahir, H. E., Mustapha, A. T., & Ma, H. (2019). Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices. *Journal of Food Biochemistry*, 43(5), 1–14. doi: 10.1111/jfbc.12832
- Pacheco-Angulo, H., Herman-Lara, E., García-Alvarado, M. A., & Ruiz-López, I. I. (2016). Mass transfer modeling in osmotic dehydration: Equilibrium characteristics and process dynamics under variable solution concentration and convective boundary. *Food and Bioprocess Technology*, 97, 88–99. doi: 10.1016/j.fbp.2015.11.002
- Pei, F., Xiao, K., Chen, L., Yang, W., Zhao, L., Fang, Y., ... Hu, Q. (2019). Mass transfer characteristics during ultrasound-assisted osmotic dehydration of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2213–2223. doi: 10.1007/s13197-019-03707-8
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216–1217. doi: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x
- Qiu, L., Zhang, M., Tang, J., Adhikari, 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
- Rahman, M. S. (2017). State diagram of foods and Its importance to food stability during storage and processing. En J. Ahmed (Ed.), *Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials* (pp. 251–260). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9781118935682.ch11
- Rahman M, S. M. A. (2015). Osmotic dehydration of pumpkin using response surface methodology -influences of operating conditions on water loss and solute gain.



- Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 05(05). doi: 10.4172/2155-9821.1000226
- Rongtong, B., Suwonsichon, T., Ritthiruangdej, P., & Kasemsumran, S. (2018). Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. *Agriculture and Natural Resources*, 52(6), 557–564. doi: 10.1016/j.anres.2018.11.023
- Samborska, K., Eliasson, L., Marzec, A., Kowalska, J., Piotrowski, D., Lenart, A., & Kowalska, H. (2019). The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extract to sugar solution on osmotic dehydration and sensory properties of apples. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1927–1938. doi: 10.1007/s13197-019-03658-0
- Sangeeta, & Hathan, B. S. (2016). Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam (*Amorphophallus* spp.) during osmotic dehydration in sodium chloride solution: Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3), 521–530. doi: 10.1111/jfpp.12631
- Sethi, K., & Kaur, M. (2019). Effect of osmotic dehydration on physicochemical properties of pineapple using honey, sucrose and honey-sucrose solutions. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 6257–6262. doi: 10.35940/ijeat.A2026.109119
- Shamaei, S., Emam-Djomeh, Z., & Moini, S. (2012). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: Effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties: ultrasound-osmotic dehydration of cranberry. *Journal of Texture Studies*, 43(2), 133–141. doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x
- Sucheta, Chaturvedi, K., & Yadav, S. K. (2019). Ultrasonication assisted salt-spices impregnation in black carrots to attain anthocyanins stability, quality retention and antimicrobial efficacy on hot-air convective drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104661. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104661
- Tiroutchelvame, D., Sivakumar, V., & Maran, P. (2015). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of amla (*Embllica officinalis* L.) cubes in sugar solution.

*Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(4), 547–559. doi: 10.2298/CICEQ140712011T

Yılmaz, F. M., & Ersus Bilek, S. (2018). Ultrasound-assisted vacuum impregnation on the fortification of fresh-cut apple with calcium and black carrot phenolics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 509–516. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.07.007

Zhao, Y., & Xie, J. (2004). Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(9), 434–451. doi: 10.1016/j.tifs.2004.01.008

## II. JUSTIFICACIÓN

La osmodeshidratación de alimentos es una técnica que permite incrementar la vida de anaquel de diversas frutas. En este tipo de matriz alimenticia, el agente osmótico más usado es la sacarosa; sin embargo, el uso de jugos concentrados de frutas puede ser una alternativa para desarrollar nuevos alimentos con mayor cantidad de compuestos bioactivos y mínimamente procesados. Para poder reemplazar el uso de sacarosa como agente osmótico es importante analizar las cinéticas de proceso con el fin de verificar que se alcance un equilibrio osmótico. Dicho equilibrio permite garantizar una impregnación homogénea en el tejido de la matriz alimenticia.

Es importante analizar la impregnación de solutos (de jugos de frutas) en el tejido de la matriz alimenticia osmodeshidratada, ya que cuando estos se aglomeran en la superficie del producto se produce una impregnación heterogénea que limita el proceso de transferencia de masa. La implementación de presión de vacío, el uso de una metodología de superficie de respuesta y el análisis de tinción de tejido mediante procesamiento de imágenes son herramientas para evitar este tipo de inconvenientes.

Durante el secado convectivo de frutas osmodeshidratadas con y sin presión de vacío es importante analizar las cinéticas de velocidad de secado y de transferencia de agua para verificar que la incorporación de solutos no afecta a la velocidad de transferencia de masa. Este análisis es de gran importancia en la industria de secado ya que se podría predecir mediante modelos cinéticos el tiempo necesario y las condiciones adecuadas de proceso para garantizar la vida útil del producto.

Los modelos y análisis de este trabajo se desarrollaron para procesos de impregnación y osmosis (con y sin presión de vacío) de manzana *Granny Smith* en jugos concentrados de frutas debido a que su porosidad permite incorporar diversos solutos. Sin embargo, las metodologías desarrolladas pueden adaptarse para otro tipo de matrices alimenticias.

### III. OBJETIVOS

#### *Objetivo general*

Evaluar la influencia de diferentes variables de proceso en la transferencia de masa, la incorporación de compuestos bioactivos y la vida útil de manzanas sometidas a procesos de osmodeshidratación, impregnación al vacío y secado utilizando jugos concentrados como agentes osmóticos.

#### *Objetivos específicos*

1. Determinar y describir matemáticamente las curvas de proceso de transferencia de masa durante la osmodeshidratación de manzana, utilizando jugos concentrados de manzana como agente osmótico.
2. Evaluar mediante una metodología de superficie de respuesta, algunas condiciones de proceso de impregnación al vacío, como el efecto de la presión, tiempo de inmersión y concentración de jugo de uva *Victoria*, en la calidad de manzana.
3. Evaluar mediante un modelo lineal general el efecto de la variedad de manzana y concentraciones de jugo de zanahoria, en la calidad de la manzana.
4. Determinar y describir matemáticamente la estabilidad de manzana liofilizada previamente impregnada con jugo concentrado de zanahoria, con un modelo de tiempo de falla considerando sus propiedades físicas, fisicoquímicas y carotenoides totales, durante su almacenamiento bajo condiciones controladas.

# CAPÍTULO 1

## **Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas: Factores del proceso y métodos no térmicos**

Julio E. González-Pérez; Nelly Ramírez-Corona; Aurelio López-Malo

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla.  
Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

### *Resumen*

La deshidratación osmótica de frutas y hortalizas es un proceso lento debido a la resistencia en la transferencia de masa (MT). Esta resistencia puede modificarse variando la solución osmótica o las condiciones del proceso, o empleando tratamientos no térmicos (TNT). Algunos TNT modifican la estructura del tejido mediante la formación de poros en la membrana celular (como los pulsos eléctricos) o de microcanales (como los ultrasonidos y la osmosonificación), y otros aumentan la superficie de contacto con el tejido mediante una disminución de la presión atmosférica (como los pulsos de vacío) o generan un aumento de la presión del sistema (como las altas presiones hidrostáticas). Los cambios en la tasa de MT causados por las modificaciones en las condiciones experimentales pueden describirse con modelos matemáticos como la segunda ley de Fick. Los objetivos de esta revisión son analizar los diferentes factores que modifican la tasa de MT durante la deshidratación osmótica, examinar la aplicación de la TNT para modificar la MT y estudiar los modelos que describen estos procesos.

**Palabras clave:** Deshidratación osmótica, estructura celular, tratamientos no térmicos, transferencia de masa.

## **1.1 Introducción**

Las frutas y hortalizas son una fuente importante de compuestos nutraceuticos en la dieta humana. Estos compuestos comprenden vitaminas, minerales, fibra, pigmentos naturales y antioxidantes, los cuales pueden ser benéficos para el organismo [86, 99]. Sin embargo, el alto contenido de humedad de las frutas y hortalizas las hace susceptibles de sufrir cambios bioquímicos y microbiológicos que acortan su vida útil [23].

La deshidratación se ha utilizado para obtener alimentos con niveles de humedad bajos (con niveles de actividad de agua inferiores a 0.70) o intermedios (con niveles de actividad de agua entre 0.70 y 0.85) que pueden almacenarse durante largos períodos [96, 107]. El aumento de la temperatura durante el proceso de deshidratación reduce el tiempo del proceso, aunque las altas temperaturas conducen a la pérdida de nutrientes termosensibles, a la modificación de las características sensoriales (causadas por reacciones químicas o enzimáticas), a cambios morfométricos y a otros cambios indeseables en los parámetros de calidad [102].

La deshidratación osmótica es un método que permite la producción de alimentos de humedad intermedia. Además, ayuda a inhibir el pardeamiento enzimático, puede mejorar el aspecto y el sabor de las frutas y hortalizas. Este proceso implica la incorporación simultánea de solutos (presentes en una solución hipertónica) y la eliminación de agua [86, 99].

Durante la deshidratación osmótica, la transferencia de masa (MT) es lenta, y puede haber pérdida de vitaminas, minerales o algunos ácidos orgánicos por lixiviación de sólidos [58, 125]. Los mecanismos de la MT se ven afectados por varios parámetros que controlan la velocidad, como el agente osmótico utilizado (composición y concentración), la matriz alimentaria (características fisicoquímicas), o las condiciones del proceso (tiempo, agitación o temperatura), muchos de los cuales han sido estudiados previamente [24, 44, 51, 73, 80, 81].

En la industria alimentaria, el principal parámetro que se modifica para reducir el tiempo de tratamiento durante la deshidratación osmótica es la temperatura. Un aumento de la temperatura durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas incrementa la

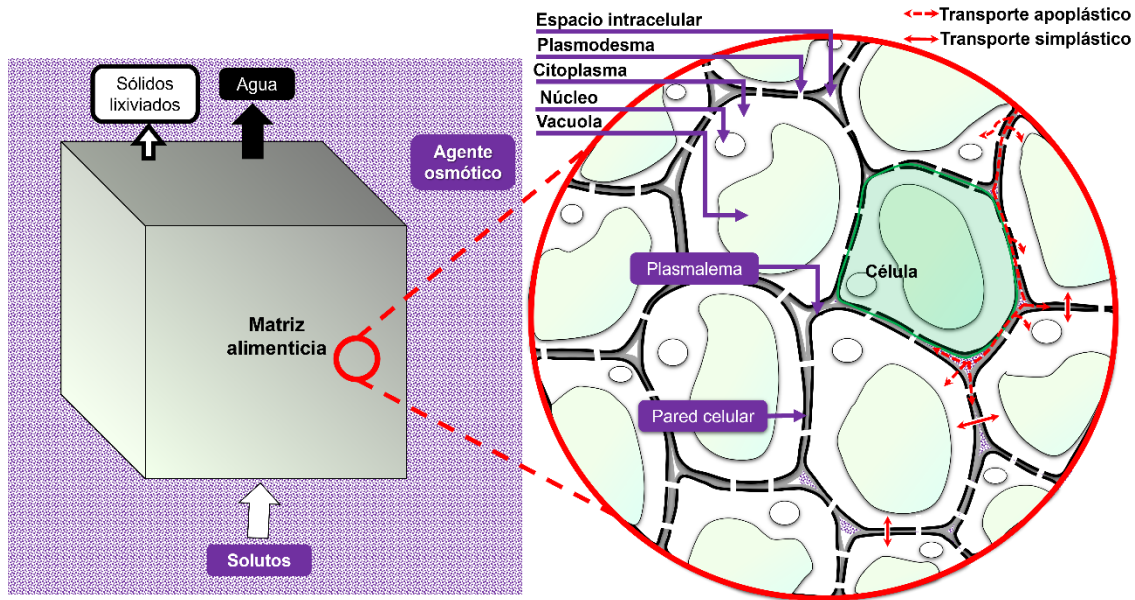
permeabilidad de su membrana celular y acelera la MT [2, 11]. Sin embargo, las altas temperaturas pueden afectar negativamente a la calidad del producto (color, textura, sabor, etc.) [13, 102]. Se han desarrollado métodos no térmicos para mejorar la MT sin afectar negativamente a la calidad. Estas técnicas incluyen el uso de altas presiones hidrostáticas, pulsos de vacío, pulsos eléctricos, ultrasonido y osmosonificación [29, 32, 67, 79, 88].

La deshidratación osmótica de frutas y hortalizas asistida por métodos no térmicos permite alterar la permeabilidad de la membrana celular sin afectar a la calidad del producto final. Esto reduce los tiempos de proceso al aumentar la velocidad de MT [34, 40, 87].

El objetivo de esta revisión fue abordar los estudios recientes sobre la modificación de la tasa de MT durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas, considerando algunos parámetros del proceso y métodos no térmicos analizados a través de modelos matemáticos y cinética del proceso.

## **1.2 Mecanismos de la deshidratación osmótica**

La deshidratación osmótica es una técnica de deshidratación parcial de los alimentos, en la que la MT tiene lugar mediante el contacto sólido-líquido por inmersión de la matriz alimenticia en una solución hipertónica [75, 89]. El proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas se presenta esquemáticamente en la **Figura 1.2.1**. La deshidratación osmótica se produce porque la concentración de solutos existente en la solución osmótica (agente osmótico) es mayor que la de la matriz alimentaria. El agua de la matriz alimentaria (de la vacuola, el citoplasma y los espacios intercelulares) pasa a la solución hipertónica mediante el transporte apoplástico, el transporte simplástico y el transporte transmembrana. El transporte apoplástico es el movimiento de material hacia la pared celular y el espacio intercelular. El transporte simplástico implica el transporte de masa de una célula a otra a través de los plasmodesmos. El transporte transmembrana se define como los intercambios entre el interior de la célula (citoplasma y vacuola) y el exterior (pared celular y espacio intercelular) a través de la membrana celular (plasmalema) [63, 116, 126].



**Figura 1.2.1** Transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica de frutas u hortalizas. Adaptado de Toupin *et al.* [116].

La membrana celular se comporta como una membrana semipermeable ya que, además de la pérdida de agua, permite la ganancia de solutos presentes en la solución osmótica (sales, azúcares, ácidos orgánicos, minerales, colorantes, etc.). Tras atravesar la membrana celular, estos solutos ocupan el volumen entre la pared y la membrana celulares [1, 26, 29]. Durante el proceso, los flujos simultáneos de solutos y agua se extienden desde la superficie del producto hasta el centro de la matriz alimenticia debido a la diferencia de presión osmótica entre la matriz alimentaria y la solución osmótica. Además, en los alimentos porosos, parte de la solución osmótica llega al centro del material por capilaridad, acelerando la deshidratación osmótica [93]. El proceso termina cuando se alcanza un estado de equilibrio osmótico, es decir, cuando la diferencia entre las presiones osmóticas es casi cero [1].

### 1.3 Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica

La tasa de MT durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas depende de muchos factores, como la naturaleza de la matriz alimentaria, la composición del agente o solución osmótica, o las condiciones del proceso, como la temperatura, la velocidad de agitación y el tiempo de inmersión (**Tablas 1.3.1 y 1.3.2**) [64, 89, 111]. La selección de las condiciones



óptimas para cada factor del proceso depende de las características deseadas del producto osmodeshidratado en el estado de equilibrio [26]. Por ejemplo, si el objetivo es obtener frutas y hortalizas confitadas (producto con pérdida de agua < ganancia de soluto), se recomienda una solución osmótica de 40 - 70 °Brix de sacarosa, glucosa, fructosa o polioles [121]. Sin embargo, el tiempo del proceso de confitado requiere desde días hasta semanas. Por otro lado, cuando la deshidratación osmótica se utiliza como un pretratamiento de secado, se recomienda un producto con pérdida de agua > ganancia de soluto [101]. Una solución osmótica de bajo peso molecular favorece el proceso de impregnación, mientras que el soluto de alto peso molecular es útil para los efectos de deshidratación [62].

**Tabla 1.3.1** Efecto de la porosidad en el grado de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas con diferente porosidad.

Fruta / hortaliza	$a_w$	Porosidad inicial	Osmodeshidratación <sup>b</sup>					
			NaCl <sup>c</sup>		Sacarosa <sup>d</sup>		Jugo conc. de Chokeberry <sup>e</sup>	
			SG <sup>f</sup>	WL <sup>g</sup>	SG <sup>f</sup>	WL <sup>g</sup>	SG <sup>f</sup>	WL <sup>g</sup>
Calabaza var. <i>Butternut</i>	0.988 <sup>abd</sup>	4.98 <sup>ab</sup>	0.019 <sup>ab</sup>	0.083 <sup>ab</sup>	0.093 <sup>defg</sup>	0.311 <sup>defg</sup>	0.120 <sup>fg</sup>	0.330 <sup>efg</sup>
Calabaza var. <i>Orange</i>	0.992 <sup>ac</sup>	8.62 <sup>ab</sup>	0.019 <sup>ab</sup>	0.088 <sup>ab</sup>	0.107 <sup>defg</sup>	0.354 <sup>efgh</sup>	0.126 <sup>g</sup>	0.376 <sup>efgh</sup>
Calabaza var. <i>Muscat de Provence</i>	0.993 <sup>ac</sup>	6.49 <sup>ab</sup>	0.024 <sup>ab</sup>	0.155 <sup>abc</sup>	0.094 <sup>defg</sup>	0.545 <sup>ij</sup>	0.121 <sup>fg</sup>	0.493 <sup>hij</sup>
Raíz de remolacha var. <i>Alto</i>	0.988 <sup>abc</sup>	4.16 <sup>a</sup>	0.002 <sup>a</sup>	0.229 <sup>bcde</sup>	0.048 <sup>bc</sup>	0.443 <sup>ghij</sup>	0.086 <sup>def</sup>	0.425 <sup>ghij</sup>
Perejil var. <i>Eagle</i>	0.983 <sup>d</sup>	22.64 <sup>c</sup>	0.001 <sup>a</sup>	0.049 <sup>a</sup>	0.049 <sup>bc</sup>	0.266 <sup>cdef</sup>	0.049 <sup>bc</sup>	0.313 <sup>defg</sup>
Zanahoria var. <i>Nerac</i>	0.989 <sup>abc</sup>	3.45 <sup>a</sup>	0.010 <sup>a</sup>	0.119 <sup>abc</sup>	0.089 <sup>def</sup>	0.378 <sup>efgh</sup>	0.11 <sup>efg</sup>	0.326 <sup>efg</sup>
Apio var. <i>Diamant</i>	0.991 <sup>abc</sup>	11.07 <sup>b</sup>	0.013 <sup>ab</sup>	0.147 <sup>abc</sup>	0.074 <sup>cde</sup>	0.403 <sup>fghi</sup>	0.099 <sup>defg</sup>	0.432 <sup>ghij</sup>
Rábano var. <i>Omny</i>	0.994 <sup>c</sup>	3.19 <sup>a</sup>	0.020 <sup>ab</sup>	0.171 <sup>abcd</sup>	0.102 <sup>defg</sup>	0.567 <sup>j</sup>	0.128 <sup>g</sup>	0.548 <sup>ij</sup>
Nabo negro var. <i>Kulata Cerna</i>	0.989 <sup>abc</sup>	20.62 <sup>c</sup>	0.027 <sup>ab</sup>	0.059 <sup>a</sup>	0.074 <sup>cde</sup>	0.453 <sup>ghij</sup>	0.129 <sup>g</sup>	0.432 <sup>ghij</sup>
Manzana var. <i>Champion</i>	0.986 <sup>bd</sup>	26.75 <sup>c</sup>	0.001 <sup>a</sup>	0.085 <sup>ab</sup>	0.088 <sup>def</sup>	0.367 <sup>efgh</sup>	0.071 <sup>cd</sup>	0.445 <sup>ghij</sup>

Los valores seguidos por la misma letra minúscula, dentro de la misma columna, no fueron significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ , prueba de Tukey). Adaptado de [62]. <sup>a</sup> Rodajas cilíndricas (18 mm de diámetro, 3.35 mm de grosor). <sup>b</sup> 45 °C, 3 g de agente osmótico / g de producto durante 90 min. <sup>c</sup> 0.05 g de NaCl / g de solución;  $a_w, NaCl = 0.9851$ . <sup>d</sup> 40 °Brix;  $a_w, sacarosa = 0.9808$ . <sup>e</sup>  $a_w, jugo = 0.9449$ . <sup>f</sup> SG: ganancia de soluto (g de soluto / g de producto fresco). <sup>g</sup> WL: pérdida de agua (g de agua / g de producto fresco).

**Tabla 1.3.2** Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas.

Agente osmótico		Condiciones de proceso	Matriz	Principales resultados	Referencias
Tipo	Concentración				
<i>Soluciones de un solo componente</i>					
NaCl	0.02 - 0.2 g NaCl / g solución	40 °C, 4 - 20 mL solución / g producto, 1440 min, 0 - 190 rpm	Zanahoria	La disminución de la relación entre el agente osmótico y la matriz alimentaria condujo a una reducción de la pérdida de agua y de la ganancia de solutos en estado de equilibrio	Pacheco-Angulo <i>et al.</i> [89]
			Ñame ( <i>Amorphoph allus spp.</i> )	La concentración de la solución y la temperatura del proceso modifican el transporte de masa	Sangeeta y Hathan [106]
	0.05 - 0.15 g NaCl / g solución	40 - 60 °C y 150 min	Calabaza ( <i>Cucurbita moschata</i> )	Los principales factores que modificaron el transporte de masa durante este proceso fueron la concentración y la temperatura de la solución osmótica y el tiempo de inmersión	Rahman <i>et al.</i> [98]
			Champiñón blanco ( <i>Agaricus bisporus</i> )	Los principales factores que modificaron el transporte de masa durante este proceso fueron la concentración y la temperatura de la solución osmótica y el tiempo de inmersión	González-Pérez <i>et al.</i> [52]
Sacarosa	30 - 50 °Brix	30 - 50 °C, 20 g solución / g producto, 240 min, 120 rpm	Litchi ( <i>Litchi chinensis Sonn</i> )	La concentración de la solución y la temperatura influyen en la tasa de transferencia de masa	Bera y Roy [14]
			Amla ( <i>Emblica officinalis L.</i> )	Las relaciones entre el agente osmótico y la matriz alimentaria de este experimento no tienen una influencia significativa en los parámetros de transferencia de masa	Tiroutchelvame <i>et al.</i> [115]
	35 - 65 °Brix	40 °C, 2 g solución / g producto 360 min, con agitación	Papaya <i>var. Khaek dam</i> ( <i>Carica papaya L.</i> )	La reducción de la actividad del agua aumentó con el incremento de la concentración de sacarosa	Rongtong <i>et al.</i> [100]
			Uchuva ( <i>Physalis peruviana L.</i> )	Las temperaturas superiores a 55 °C aumentan la reducción de los carotenoides totales (aproximadamente un 50 %)	Luchese <i>et al.</i> [65]
	40 - 70 °Brix	40 - 70 °C, 20 g solución / g producto, 1800 rpm			
	<i>Soluciones multicomponente</i>				
Jarabe de maíz (CS)	0.44 - 0.56 g CS / g solución	34 - 46 °C, 10 g solución / g producto, 120 - 210 min	Papaya ( <i>Carica papaya L.</i> )	La alta viscosidad y el contenido en polisacáridos de las soluciones de CS contribuyen a aumentar la ganancia de solutos (en la matriz osmodeshidratada durante el proceso de osmodeshidratación) en comparación con las soluciones de sacarosa	El-Aouar <i>et al.</i> [42]
Soluciones de NaCl y sacarosa	A) 5 % NaCl y 50 % sacarosa / mL solución B) 15 % NaCl y 50 % sacarosa / mL solución	5 - 50 °C, 20 g solución / g producto, 60 - 180 min	Calabaza ( <i>Cucurbita spp.</i> )	La tasa de transferencia de masa se ve influida además por la concentración de NaCl	Mokhtarian <i>et al.</i> [72]

Tabla 1.3.2. (continuación)

Agente osmótico		Condiciones de proceso	Matriz	Principales resultados	Referencias
Tipo	Concentración				
<b>Soluciones con más de un solo componente</b>					
Soluciones de NaCl ( <i>PM</i> = 58.44 g / mol), KCl ( <i>PM</i> = 74.55 g / mol) y CaCl <sub>2</sub> ( <i>PM</i> = 110.93 g / mol)	A) 10 % NaCl B) 7.5 % NaCl y 25 % KCl C) 7.0 % NaCl, 2.5 % KCl y 0.5 % CaCl <sub>2</sub> D) 5 % NaCl, 4 % KCl y 1 % CaCl <sub>2</sub>	30 °C, 10 g solución / g producto y 120 min	Berenjena ( <i>Solanum melongena</i> L.)	Los experimentos con 10 % de NaCl ( $a_w = 0.9450$ ) lograron una mayor pérdida de agua (7 - 16 % en comparación con los que tenían sustitutos de NaCl); las muestras con CaCl <sub>2</sub> tuvieron una mayor ganancia de solutos (21 % en comparación con las que no tenían CaCl <sub>2</sub> )	de Jesus Junqueira <i>et al.</i> [31]
Soluciones de glicerol ( <i>PM</i> = 92.09 g / mol), sorbitol ( <i>PM</i> = 182.17 g / mol) y con lactato de calcio a soluciones de sorbitol o glicerol al 30 - 70 %.	A) 30, 50 y 70 % glicerol o sorbitol B) 30, 50 y 70 % glicerol o sorbitol con 20 g de lactato de calcio / L solución	30 °C, 20 g solución / g producto, 720 min y 1000 rpm	Yacón ( <i>Smallanthus sonchifolius</i> )	A) El sorbitol tenía una menor permeabilidad en la matriz alimentaria debido a su peso molecular. el glicerol se utiliza para mejorar la textura (plastificante); el sorbitol se utiliza como edulcorante B) El lactato de calcio ayudó a prevenir el colapso celular	Brochier <i>et al.</i> [16]
Soluciones de sacarosa ( <i>PM</i> = 342.30 g / mol), inulina ( <i>PM</i> = 6178.02 g / mol), sacarosa-inulina, sacarosa-jugo concentrado de alcachofa, CJC (1:1) e inulina-CJC (4:1)	50 °Brix	30 y 50 °C, 2 g solución / g producto, 360 min, con agitación	Fresa var. <i>Honeye</i>	La sustitución parcial de la sacarosa (por CJC o inulina) permite obtener productos con menor contenido de humedad, mayor valor nutricional (menos azúcar simple) y enriquecidos con compuestos bioactivos. Se obtiene una menor transferencia de masa con la inulina debido a su peso molecular	Kowalska <i>et al.</i> [57]
Soluciones de glicerol ( <i>PM</i> = 92.09 g / mol), eritritol ( <i>PM</i> = 122.12 Da), glucósidos de esteviol ( <i>PM</i> = 318.45 g / mol) y Citrox	40 - 60 % glicerol, 12.5 % eritritol, 1.25 % glucósidos de esteviol y 0.2 % Citrox	25 - 45 °C, 5 g solución/g producto, 240 min	Melocotón	El glicerol permitió la reducción de $a_w$ , el eritritol y los glucósidos de esteviol sirvieron como edulcorante y el Citrox como antimicrobiano. La tasa de transferencia de masa se vio favorecida al aumentar la temperatura y la concentración de glicerol	Dermesonlou glou y Giannakourou [39]
Soluciones de sacarosa, miel y miel-sacarosa (1:1)	A) 60 - 80 °Brix B) 74 °Brix	30 y 50 °C, 7 g solución / g producto, 210 min	Piña ( <i>Ananas comosus</i> L.)	Las soluciones de sacarosa y miel-sacarosa permitieron una mayor pérdida de agua del producto que los productos tratados con soluciones de miel. Las muestras osmodeshidratadas con la solución de miel-sacarosa tuvieron una mejor aceptación sensorial	Sethi y Kaur [109]
<b>Jugos concentrados</b>					
Jugo concentrado de manzana, ACJ	40 °Brix	40 °C, 2 g solución / g producto, 120 min	Cereza ácida var. <i>Turgieniewka</i> ( <i>Prunus cerasus</i> L.)	La deshidratación osmótica con ACJ enriqueció la cereza ácida en el contenido de polifenoles (16 %) y la actividad antioxidante (35 %) en comparación con el producto fresco	Nowicka <i>et al.</i> [82]

Tabla 1.3.2. (continuación)

Agente osmótico		Condiciones de proceso	Matriz	Principales resultados	Referencias
Tipo	Concentración				
<b>Jugo concentrado</b>					
Jugo concentrado de <i>Chokeberry</i> , CJC ( <i>Aronia melanocarpa</i> )	40 °Brix	50 °C, 3 mL solución / g producto, 120 min	Remolacha (betabel) var. <i>Alto FI</i>	El uso de CJC durante la etapa de deshidratación osmótica podría mejorar la funcionalidad y el color de los productos secos al transferir compuestos bioactivos y organolépticos activos a la matriz alimentaria	Lech <i>et al.</i> [60]
		45 °C, 3 mL solución / g producto, 120 min	<i>Arándano negro o black chokeberry</i> ( <i>Aronia melanocarpa</i> )	Los productos secos pretratados mediante deshidratación osmótica mostraron una mayor porosidad y un menor amargor en comparación con las muestras no tratadas	Calín-Sánchez <i>et al.</i> [17]
		45 °C, 2 mL solución / g producto, 90 min	Arilo de granada var. <i>Mollar de Elche</i> ( <i>Punica granatum</i> L.)	El uso de CJC durante la deshidratación osmótica mejora la aceptación sensorial (parámetros de apariencia y homogeneidad del color) en comparación con las muestras no tratadas	Cano-Lamadrid <i>et al.</i> [18]
	60 °Brix	40 y 60 °C, 4 g solución / g producto, 120 min, 60 rpm	Manzana var. <i>Braeburn</i>	El color de las muestras osmodeshidratadas con CJC es más estable ( $p < 0.05$ ) que las muestras osmodeshidratadas con sacarosa (en las mismas condiciones) durante 12 meses de almacenamiento	Cichowska y Kowalska [25]
	65 °Brix	45 °C, 4 g solución / g producto, 1440 min, 60 rpm	Manzana var. <i>Gala</i>	El uso de CJC durante la deshidratación osmótica de manzanas mejora la aceptación sensorial (parámetros de color y sabor) en comparación con el producto deshidratado osmóticamente con soluciones de sacarosa en las mismas condiciones	Samborska <i>et al.</i> [105]
Jugo concentrado de granada var. <i>Wonderful</i> (PW) PW-CJC (1:1, v/v) PW-AJC (1:1, v/v) AJC-CJC (1:1, v/v) AJC-CJC (3:1, v/v)	40 °Brix	45 °C, 2 mL solución/g producto, 90 min	Arilos de granada var. <i>Mollar de Elche</i> ( <i>Punica granatum</i> L.)	Todos los arilos osmodeshidratados sumergidos en jugo concentrado alcanzaron el mismo contenido de humedad. El uso de PW y PW- CJC como solución osmótica ayudó a aumentar la ganancia de solutos, lo que implicó un aumento del contenido total de antocianinas en el producto	Cano-Lamadrid <i>et al.</i> [18]
Soluciones de jugo concentrado de grosella negra, CJBC; Cereza ácida, CJSC; frambuesa, CJRB; membrillo, CFQ y flor de membrillo, CJFQ; CJA y CJC	40 °Brix	40 °C, 2 mL / g producto, 90 min	Cereza ácida var. <i>Turgieniewka</i> ( <i>Prunus cerasus</i> L.)	El proceso de deshidratación osmótica con CJCS y CJC enriqueció a la cereza ácida seca con 6.4 - 22.4 % en polifenoles, respectivamente; el uso de CJC aumentó a 1.5 veces en procianidinas poliméricas, y el uso de CJBC redujo el contenido de antocianinas a 10.14 %	Nowicka <i>et al.</i> [83]

### 1.3.1 Factores de la matriz alimentaria

Durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas, la composición química y las propiedades físicas de la matriz alimentaria influyen en la cinética de la MT. En el caso de la composición química, algunos estudios indican que la variedad de la fruta u hortaliza y el grado de madurez pueden afectar a la velocidad del proceso debido al tipo y concentración de los compuestos presentes en el producto [1, 114]. Mavroudis *et al.* [69] compararon la ganancia de agua y la pérdida de solutos durante la deshidratación osmótica (50 °Brix de sacarosa a 5 - 40 °C) de diferentes variedades de manzana, concretamente *Kim*, *Mutsu* y *Jonagold*. Los autores encontraron que la MT durante el proceso variaba entre las variedades. En las var. *Kim* y *Jonagold* se produjo una mayor pérdida de agua (0.20 - 0.45 g de agua / g de producto) en relación con la ganancia de soluto (0.10 - 0.12 g de soluto / g de producto). En la var. *Mutsu*, la pérdida de humedad fue baja, pero hubo una mayor ganancia de solutos, lo que dio lugar a un producto adecuado para confitería. Sulistyawati *et al.* [114] osmodeshidataron (60 °Brix de sacarosa a 60 °C) mangos de la var. *Keny* en diferentes grados de madurez (inmaduros 13.2 °Brix y maduros 15.7 °Brix). Encontraron que los mangos inmaduros ganaban de 2 a 5 veces más sólidos que los maduros.

La cinética del proceso también puede verse afectada por las propiedades físicas de la matriz del alimento, incluyendo factores como la cáscara, la porosidad, el tamaño y la forma, entre otros [20, 34]. La cáscara de las frutas y hortalizas ejerce una resistencia a la MT [4, 55]. Normalmente, esta resistencia puede reducirse pelando o cortando el producto [50]. Sin embargo, la calidad (textura, color característico y otros atributos) de algunos productos puede verse modificada por el pelado. Por esta razón, la matriz alimentaria se somete a tratamientos que, en cambio, aumentan la permeabilidad de la cáscara [5]. Alfaro *et al.* [4] modificaron la permeabilidad de la cáscara de *Vaccinium angustifolium* Ait. sumergiéndola en nitrógeno líquido (-196 °C durante 10 s). Durante el proceso de deshidratación osmótica (60 °Brix de sacarosa a 40 °C durante 8 h), los frutos tratados por este método perdieron un 20 % más de humedad y ganaron un 23 % más de solutos en comparación con el mismo producto sin pretratamiento.

La **Tabla 1.3.1** muestra el efecto de la porosidad de la matriz alimentaria y de los diferentes agentes osmóticos sobre la MT durante la deshidratación osmótica. Lech *et al.*

[62] estudiaron el efecto de la porosidad de la matriz alimentaria y como afectaba en la deshidratación osmótica con jugo concentrado de arándano rojo. Los alimentos con menor porosidad, como el rábano var. *Omny* y la zanahoria var. *Nerac*, en los que había más tejido celular disponible para la MT, mostraron una mayor pérdida de agua y ganancia de solutos en comparación con los de mayor porosidad (manzana var. *Champion*). Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de aire en los tejidos porosos, lo que implica menos masa (tejidos celulares y agua) en mayor volumen [22]. La presencia de aire puede suponer una barrera en los sistemas que funcionan a presión atmosférica, por tanto, se conseguiría una mayor MT en alimentos con menor porosidad, sin embargo, si se elimina el aire, podría ser una ventaja al aumentar el área en los alimentos porosos.

Ruiz-López *et al.* [101] compararon las características de la MT durante la deshidratación osmótica (0.10 y 0.25 g de NaCl / g de solución, 4 g de solución / g de producto a 25 °C durante 3 h) de trozos de chayote con diferentes dimensiones (1 m × 1 m × 2 m y 1 m × 1 m × 4 cm). Los autores encontraron que las muestras más pequeñas alcanzaron el equilibrio más rápidamente, y concluyeron que el tiempo de proceso era proporcional a la longitud característica de la matriz alimentaria. González-Pérez *et al.* [52] analizaron los cambios en la tasa de MT causados por el encogimiento y la deformación de la matriz alimentaria durante la deshidratación osmótica (solución de 0.10 y 0.25 g de NaCl/g de solución, 15 g de solución / g de producto, 40 °C, 60 °C, y 80 °C) de púños de champiñón blanco. Los autores encontraron que, si el encogimiento del producto no se incluía en su modelo de deshidratación osmótica, los valores de pérdida de agua y la ganancia de soluto se sobreestimaban en un 39 – 113 % y 24 – 66 %, respectivamente.

### 1.3.2 Agente osmótico

La naturaleza del agente osmótico (solución osmótica) es un factor importante en la producción de frutas y hortalizas osmodeshidratadas [2]. El tipo y la concentración del agente osmótico influyen en la presión osmótica (**Tablas 1.3.1 y 1.3.2**), que es la fuerza motriz de la MT [21].

### 1.3.2.1 Tipos de agente osmótico

Las características del agente osmótico que deben considerarse en el proceso de deshidratación osmótica son la actividad del agua, el peso molecular, y la solubilidad o estado iónico de las especies químicas presentes en la solución [61].

La actividad del agua ( $a_w$ ) es la propiedad fisicoquímica más importante. Cuanto mayor sea la diferencia entre la  $a_w$  del agente osmótico y la matriz alimentaria, mayor será la fuerza impulsora de la MT [61]. Algunos ejemplos relacionados con la influencia de la  $a_w$  en la MT de diferentes frutas y hortalizas (con  $a_w = 0.983 - 0.994$ ) se presentan en la **Tabla 1.3.1**. El jugo concentrado de mora ( $a_w = 0.9449$ ) dio lugar a una mayor pérdida de agua y ganancia de soluto en comparación con la solución de NaCl ( $a_w = 0.9851$ ). Esto se atribuye a que la diferencia entre la  $a_w$  del jugo concentrado de mora y la de la matriz de alimentos frescos es mayor que la de la solución de NaCl probada. La MT del agua y de los solutos puede ser limitada cuando la  $a_w$  de la matriz alimentaria y de la solución osmótica son similares, lo que implica una fuerza motriz reducida. Esta limitación se observa en algunas frutas y hortalizas osmodeshidratadas (calabaza var. *Butternut*, remolacha var. *Alto*, perejil var. *Eagle* y manzana var. *Champion*) con 0.05 g de NaCl / g de solución (**Tabla 1.3.1**). La MT de estos ejemplos no se debe a la presión osmótica porque la diferencia entre la  $a_w$  del alimento fresco y el agente osmótico (solución isotónica) es relativamente nula. La pérdida de agua fue más predominante que la ganancia de soluto, lo que sugiere que la MT puede deberse a otros factores como la temperatura del sistema. Por otra parte, una solución hipertónica (en relación con el alimento osmodeshidratado) con solutos de bajo peso molecular puede penetrar fácilmente en las células de las frutas y hortalizas en comparación con una solución hipertónica con solutos de mayor peso molecular y la misma  $a_w$  [16].

La selección del tipo de solución osmótica depende principalmente de la compatibilidad con el alimento procesado. Por lo general, el NaCl se utiliza con hortalizas, carne roja, pescado, etc. y la sacarosa, otros edulcorantes o jugos concentrados se utilizan con frutas o ciertas hortalizas [62]. La influencia de varios agentes osmóticos se muestra en la **Tabla 1.3.2**.

### **1.3.2.2 Concentración de agente osmótico**

La concentración de la solución desempeña un papel importante en la tasa de MT. Los estudios han indicado que un aumento en la concentración del soluto resulta en una mayor pérdida de agua y ganancia de soluto [111], tal comportamiento es observado principalmente con soluciones de NaCl y sacarosa. En el caso de soluciones osmóticas con más de un componente (soluto), la tasa de MT se ve influenciada principalmente por la concentración del compuesto de menor peso molecular, como indican los resultados de los estudios presentados en la **Tabla 1.3.2** [31, 37, 72].

### **1.3.3 Condiciones del proceso**

La influencia de las condiciones del proceso de deshidratación osmótica se ha estudiado en los últimos años [62]. La literatura proporciona estudios sobre cómo afecta a la MT las variaciones de: la temperatura, la relación de agente osmótico y la matriz alimenticia, el tiempo de inmersión y la agitación del sistema osmótico (**Tabla 1.3.2**).

#### **1.3.3.1 Temperatura de la solución osmótica**

Algunas investigaciones han encontrado que la temperatura de la solución osmótica puede favorecer la ganancia de solutos ya que a medida que aumenta la temperatura, la solubilidad de los solutos en el líquido también [70], y se modifica la viscosidad del medio osmótico [42]. Del mismo modo, un aumento de la temperatura del sistema puede aumentar la pérdida de agua [37, 106]. Sin embargo, las temperaturas no deben superar los 60 °C, ya que pueden dañar los tejidos de la planta, provocando el colapso de la matriz alimentaria [99] o aumentando la pérdida de compuestos como los carotenoides [65].

#### **1.3.3.2 Relación entre el agente osmótico y la matriz alimentaria**

La relación entre el peso (o volumen) del agente osmótico y el peso de la muestra a procesar son de gran importancia durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas.



Este equilibrio puede afectar a la cinética de la MT, ya que el agua perdida del alimento durante el proceso disminuye la concentración de la solución osmótica [1]. Se recomienda una relación entre el producto y la solución osmótica de al menos 1:15 (p / p) cuando se trabaja con soluciones de NaCl, o de 1:2 o 1:3 (p / p) para soluciones de sacarosa. Sin embargo, la proporción elegida depende de la concentración que alcanzará la solución osmótica debido a la dilución por el agua perdida del producto durante el proceso [89, 111, 115].

### **1.3.3.3 Tiempo de inmersión**

El aumento del tiempo de inmersión mejora la MT. Al principio del proceso de deshidratación osmótica, la MT es rápida; a medida que la solución osmótica gana agua, la diferencia en las presiones osmóticas del producto y la solución disminuye, reduciendo la tasa de MT, eventualmente, hasta el equilibrio [1]. Nótese también que la contracción tisular del producto puede ocurrir simultáneamente con el proceso de deshidratación, reduciendo el espacio físico en el que puede ocurrir la MT [99].

### **1.3.3.4 Agitación**

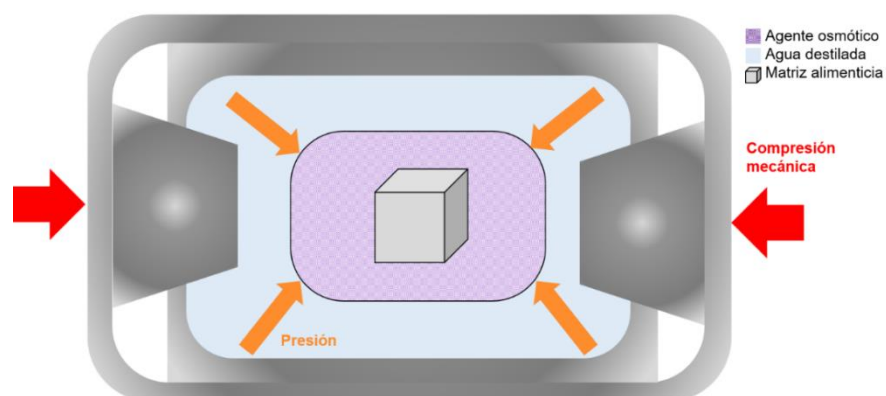
Durante la deshidratación osmótica, la pérdida de agua del producto puede diluir localmente la solución osmótica en las proximidades del producto. El uso de la agitación durante el proceso puede mejorar esto al mantener la solución homogénea en el contacto entre el producto y la solución. Aunque la agitación ayuda el efecto de dilución sigue disminuyendo la tasa de MT [11]. En general, para soluciones con solutos de bajo peso molecular, como el NaCl, se han utilizado velocidades de agitación de 120 - 190 rpm, y también se han utilizado velocidades similares para soluciones de 30 - 50 °Brix de sacarosa [14, 115]. Cuando el agente osmótico es más viscoso (por ejemplo, soluciones de sacarosa, sorbitol o glicerol con concentraciones superiores a 60 °Brix), la velocidad de agitación requerida oscila entre 1000 y 1800 rpm [16, 65].

## 1.4 Métodos no térmicos aplicados en la deshidratación osmótica para modificar la transferencia de masa

Como se ha presentado en las secciones anteriores, la única fuerza impulsora de la MT durante la deshidratación osmótica es la presión osmótica, que afecta a la tasa de MT. Se han estudiado varios métodos no térmicos como pretratamiento para mejorar la eficiencia del proceso (mediante la modificación de la MT) y la calidad del producto final. Estas técnicas incluyen el tratamiento con alta presión hidrostática, el uso de vacío o pulsos eléctricos, el ultrasonido y la osmosonificación [43, 99].

### 1.4.1 Alta presión hidrostática

El tratamiento de los alimentos con alta presión hidrostática (HHP) consiste en someter el producto a presiones de 50 - 1000 MPa [123]. La combinación de HHP con deshidratación osmótica (ODHHP) consiste en sellar al vacío la matriz alimenticia en bolsas de polietileno junto con 3 - 20 g de solución osmótica / g de producto [49, 66]. A continuación, la bolsa se coloca en un sistema cerrado que contiene el medio de transmisión de presión (agua destilada o propilenglicol al 30 %) [37, 120] que transmitirá la presión por compresión física mediante la reducción mecánica del volumen (**Figura 1.4.1**). Cuando las frutas y hortalizas son pretratadas con HHP, la membrana celular se vuelve permeable, facilitando la difusión y proporcionando mayores tasas de deshidratación [34].



**Figura 1.4.1** Representación esquemática de la reducción mecánica del volumen para generar una alta presión hidrostática. Adaptado de [128].

En la **Tabla 1.3.2**, se muestran ejemplos de la aplicación de HHP para ayudar a la deshidratación osmótica de las frutas. Algunos investigadores han utilizado el HHP para aumentar la pérdida de agua a través de la ruptura de la pared celular [114, 120]. Además, la  $a_w$  de las muestras osmodeshidratadas y el tiempo del proceso de osmodeshidratación se redujeron debido al tratamiento con HHP [40, 49, 84]. Sin embargo, la modificación de la pared celular no siempre modifica la MT durante el proceso de deshidratación osmótica [37, 84, 85]. Núñez-Mancilla *et al.* [84] trataron *Fragaria vesca* en soluciones de 40 °Brix de sacarosa con OD-HHP y no encontraron diferencias significativas en los parámetros de MT al aplicar presiones hidrostáticas  $> 400$  MPa. Dermesonlouoglou *et al.* [37] encontraron que la modificación de la pared celular en melocotones y albaricoques tras el tratamiento con HHP (100 MPa) con deshidratación osmótica afectaba a la dureza del producto final. Por otro lado, se ha demostrado que la deshidratación osmótica asistida por HHP influye en la composición nutricional y en las características de calidad. Se ha demostrado la inhibición de microorganismos, lo que aumenta la vida útil en comparación con las muestras osmodeshidratadas de forma convencional [40, 36, 38]. Sin embargo, a medida que aumenta la HHP, puede haber un impacto negativo en el color del producto, por ejemplo, las fresas tratadas con HHP a 300 - 500 MPa experimentaron un mayor oscurecimiento del producto osmodeshidratado en comparación con las tratadas a 200 - 300 MPa [84]. En general, la aplicación de HHP no reduce la tasa de MT, pero es una buena alternativa para modificar la dureza y aumentar la composición nutricional o la vida útil de los productos osmodeshidratados.

Sin embargo, los niveles de presión hidrostática deben determinarse para preservar la calidad del producto final. Los índices de MT durante la deshidratación osmótica mediante el tratamiento HHP son mayores debido a los daños en la estructura de la pared celular, que hacen que las células sean más permeables facilitando la transferencia de masa por difusión.

#### **1.4.2 Pulsos de vacío**

La deshidratación osmótica asistida por vacío (o deshidratación osmótica asistida por pulsos de vacío, OD-VP) consiste en aplicar presión de vacío a un sistema sólido-líquido,

seguida de restablecimiento de la presión atmosférica. Bajo el vacío, se elimina el gas o el líquido contenido en los poros del producto. Cuando se restablece la presión atmosférica, la solución externa penetra en el espacio de los poros del alimento [114], reflejando un aumento de la interfaz sólido-líquido y, en consecuencia, un aumento de la MT [1].

Algunas aplicaciones de la OD-VP se muestran en la **Tabla 1.4.1**. La mayoría de los estudios se han aplicado a frutas y hortalizas sumergidas en soluciones osmóticas de sacarosa (30 - 70 °Brix); las presiones de vacío van de 0.0099 - 0.0253 MPa, y los tiempos de aplicación de vacío van de 2 a 20 min. Estos estudios demostraron que un aumento de presión de vacío durante la OD-VP da lugar a productos con menor contenido de agua y una menor ganancia de solutos [104], lo que facilita la reducción de  $a_w$  [32, 27]. La tasa de MT de algunos alimentos osmodeshidratados aumenta debido al tratamiento de pulso al vacío [27, 45, 47, 76, 103].

También se ha demostrado que la tasa de MT se ve afectada por la porosidad de la matriz del alimento [74]. Además, el OD-VP puede mejorar la composición nutricional y la calidad del producto osmodeshidratado. Los estudios han demostrado que la impregnación de probióticos en las manzanas puede incrementarse aumentando la concentración de solutos presentes en la solución de sacarosa circundante y que las dobles emulsiones ( $W_1/O/W_2$ ) formadas con *Lactobacillus rhamnosus* LC70 / aceite de semilla de uva / proteína de suero [47] también pueden mejorar el color, la textura y el sabor de los alimentos secos [8, 99]. En general, la aplicación de OD-VP es una buena alternativa para acelerar la MT, ya que el tratamiento de pulsos de vacío aumenta la superficie entre la fruta y la solución osmótica.

**Tabla 1.4.1** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistida por alta presión hidrostática.

Matriz	Variables de proceso	Condiciones de osmodeshidratación	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
Melocotones ( <i>Prunus persica</i> L.) y albaricoques ( <i>Prunus armeniaca</i> L.)	600 MPa, 10 MPa/s rampa de velocidad, temperatura: 25 °C, tiempo de tratamiento: 5 min	50 % de glicerol (p/p), 12.5 % de eritritol (p/p), 3.5 % de NaCl (p/p), 1.5 % de CaCl <sub>2</sub> (p/p), 1.25 % de glucósidos de esteviol (p/p) y 0.2 % de Citrox (p/p); 5 g de solución osmótica/g de producto; 45 °C; 45 min	La velocidad de MT y la $a_w$ de los melocotones y albaricoques tratados con OD-HHP no presentaron diferencias significativas con las muestras osmodeshidratadas. Las muestras tratadas con HHP aumentaron la dureza de las muestras osmodeshidratadas. Con HHP, se incrementó la velocidad de MT y se redujo el tiempo de proceso	Dermesonlouoglou <i>et al.</i> [37]
Manzana	50, 150, 250 y 350 MPa; temperatura 15 °C, tiempo de tratamiento: 10 min y tiempo de descompresión: 10 s	Jarabe de sacarosa o kokum de 50 °Brix, 3 g de solución osmótica/g de producto		George <i>et al.</i> [49]
Fresa de la var. <i>Camarosa</i> ( <i>Fragaria Vesca</i> )	100, 200, 300, 400 y 500 MPa; rampa de velocidad de 17 MPa/s, temperatura: 15 °C, tiempo de tratamiento: 10 min y tiempo de descompresión: 5 s	40 °Brix sacarosa, 4 g solución osmótica /g producto	La HHP puede aplicarse para mejorar las tasas de transferencia de masa y para reducir la $a_w$ de las muestras osmodeshidratadas. El contenido fenólico total aumentó con el aumento de la presión. El contenido de vitamina C no cambió con el aumento de la presión. No se observaron cambios significativos en la MT a presiones superiores a 400 MPa	Núñez-Mancilla <i>et al.</i> [84]
	600 MPa, rampa de velocidad de 10 MPa/s, temperatura: 25 °C, tiempo de tratamiento: 5 min	50 % de glicerol (p/p), 12.5 % de eritritol (p/p), 1 % de glucósidos de esteviol (p/p), 0.2 % de ácido ascórbico (p/p), 1.5 % de CaCl <sub>2</sub> (p/p), 1 % de ácido cítrico (p/p), 0.20 % de L-cisteína HCl (p/p) y 0.1 % de Citrox (p/p); 5 g de solución osmótica/g de producto; 15 – 45 °C, 240 min	Se logró una disminución significativa de la $a_w$ en las muestras tratadas con OD-HHP en comparación con las muestras osmodeshidratadas. El tratamiento no modificó los parámetros de la MT. La vida útil se prolongó significativamente tanto para el OD-HHP como para el OD (hasta 10 y 4 meses a 5 °C, respectivamente)	Dermesonlouoglou <i>et al.</i> [40]
Jitomate var. <i>Heinz</i> 3402	600 MPa, rampa de velocidad de 10 MPa/s, temperatura: 25 °C, tiempo de tratamiento: 5 min	50 % de glicerol (p/p), 12.5 % eritritol (p/p), 3.5 % NaCl (p/p), 1.5 % CaCl <sub>2</sub> (p/p) y 0.2 % Citrox (p/p); 5 g solución osmótica /g producto; 35 °C, 90 min	La aplicación de HHP no cambió significativamente los niveles de sólidos solubles y $a_w$ con las muestras osmodeshidratadas. La vida útil de las muestras OD y OD-HHP almacenadas a 5 °C se estimó en 77 y 181 días, respectivamente	Dermesonlouoglou <i>et al.</i> [36]
Mango maduro e inmaduro var. <i>Kent</i> ( <i>Mangifera indica</i> L.)	300 MPa, rampa de velocidad de 6.7 MPa/s, temperatura: 50 °C, tiempo de tratamiento: 3 - 5 min y tiempo de descompresión: 10 s	60 °Brix de sacarosa, 2 % de lactato de calcio (p/p) o 0.48 % de PME (mL/g), 4 g de solución osmótica/g de producto, 30-240 min	El uso de mango inmaduro y la aplicación de OD-HHP sin PME fue favorable para una alta ganancia de solutos y una baja pérdida de agua (un producto de mango confitado)	Sulistyawati <i>et al.</i> [114]
Platano ( <i>Musa cavendishii</i> )	200 MPa, rampa de velocidad de 3.3 MPa/s, temperatura: 25 °C, tiempo de tratamiento: 5 min y tiempo de descompresión: 10 s	30 – 70 °Brix de sacarosa, 5 g solución osmótica/g producto, 30 – 70 °C, 480 min, 120 rpm	La mayor pérdida de agua (22 % más) y ganancia de solutos (50.5 % más) en comparación con las muestras no tratadas se atribuyó a la rotura de la pared celular por la presión aplicada	Verma <i>et al.</i> [120]

<sup>a</sup> MT: transferencia de masa; HHP: altas presiones hidrostáticas; OD: deshidratación osmótica; OD-HHP: deshidratación osmótica asistida por altas presiones hidrostáticas; <sup>b</sup> PME: pectinmetilesterasa.

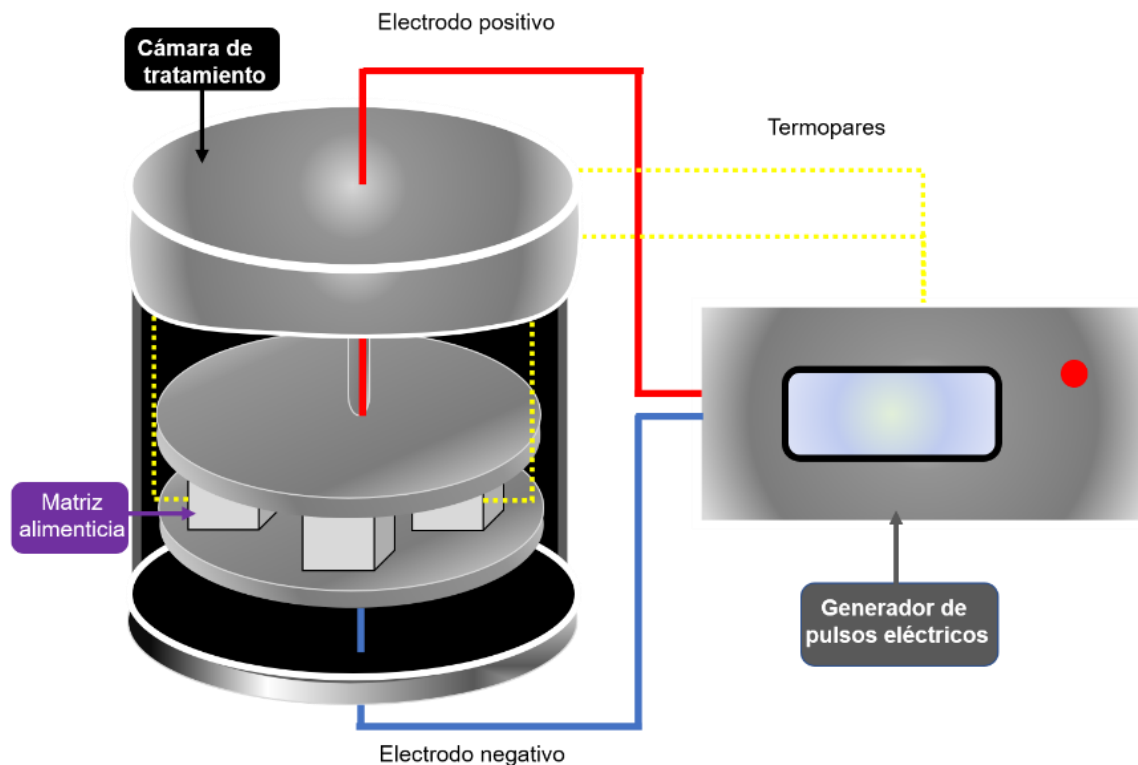
Tabla 1.4.1 (continuación).

Matriz	Variables de proceso		Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
	Presión de vacío	Tiempo			
Higos ( <i>Ficus carica</i> L.)	0.99 × 10 <sup>-2</sup> MPa (74 mmHg)	5 min	40 - 60 °Brix de sacarosa, 40 °C, 10 g solución osmótica / g producto, 240 min	El aumento de la concentración de sacarosa incrementa la pérdida de agua y la ganancia de solutos	de Mello Jr <i>et al.</i> [32]
	1.31 × 10 <sup>-2</sup> MPa (98 mmHg),	15 min	50 °Brix de sacarosa, 50 °C, 4 g solución osmótica / producto, 165 min	El uso de deshidratación osmótica asistida por PV acorta el periodo de secado, ya que ayuda a eliminar mayor contenido de agua y menor ganancia de solutos	Şahin y Öztürk [103]
	2.53 × 10 <sup>-2</sup> MPa (190 mmHg)	15 min	50 °Brix de sacarosa, 50 °C, 4 g solución osmótica / producto, 180 min	La deshidratación osmótica asistida por PV permite reducir el tiempo de secado, sin embargo, las muestras tratadas con este proceso se encogieron más (3 %) que las muestras sin tratamiento	Şahin y Öztürk [104]
Manzana var. <i>Ligol</i>	0.008, 0.0067 y 0.080 MPa (60, 502.5 y 600 mmHg)	2 min	30, 50 y 70 °Brix de sacarosa, 5 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 180 min	Entre mayor es la presión de vacío, se obtienen productos osmodeshidratados con menor ganancia de sólidos. Si el objetivo es obtener productos con mayor ganancia de solutos es recomendable trabajar a bajas presiones de vacío	Muszyński, Kornarzyński y Gładyszewska [76]
Manzana var. <i>Granny Smith</i>	0.0114 MPa (85.4 mmHg)	20 min	9 g de sacarosa / g de emulsión W <sub>1</sub> /O / W <sub>2</sub> (emulsión agua en aceite, W <sub>1</sub> / O se formó con la 9.98 × 10 <sup>8</sup> UFC de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> LC705 /mL y 62 g aceite de semilla de uva; finalmente 30 g de la emulsión W <sub>1</sub> / O se dispersó en 70 g de solución de 14 % de concentrado de proteína de suero de leche); 40 - 60 °Brix; 20 g solución osmótica / g producto; 320 min	Se promovió una mayor incorporación de probióticos cuando la ganancia de sólidos aumenta con el tiempo. Asimismo, la deshidratación osmótica asistida con PV produce una mayor impregnación de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> respecto al proceso a presión atmosférica (7.52 × 10 <sup>7</sup> - 1.75 × 10 <sup>8</sup> UFC / g)	Flores-Andrade <i>et al.</i> [47]
Manzana, mango, melón	0.0135 - 0.067 MPa (101.25 - 505.5 mmHg)	10 min	40 - 60 °Brix de sacarosa, 10 g solución osmótica / g producto, 25°C, 20 min	La velocidad de transferencia de masa es favorecida en frutas con altos niveles de porosidad (manzana)	Mújica-Paz <i>et al.</i> [74]
Manzana ( <i>Malus pumila</i> Mill)	0.02 MPa (150 mmHg)	5 y 10 min	30 - 60 °Brix de sacarosa, 10 - 55 °C, 10 g solución osmótica / g producto, 240 min	Las muestras sin presión de vacío tuvieron mayor ganancia de solutos	Wang <i>et al.</i> [122]

<sup>a</sup> PV: pulsos de vacío, UFC: unidades formadoras de colonia

### 1.4.3 Pulsos eléctricos

El tratamiento por pulsos eléctricos consiste en la aplicación de una corriente eléctrica a través de la matriz alimenticia (**Figura 1.4.2**) [112]. En las frutas y hortalizas, este tratamiento puede provocar cambios en la permeabilidad de la membrana celular (una bicapa de fosfolípidos) debido a la electroporación o electrocompresión [59]. La electroporación se produce cuando el campo eléctrico externo induce cambios conformacionales y la reorganización de la bicapa de fosfolípidos, generando poros [118]. La electrocompresión se produce cuando los electrolitos de carga opuesta se acumulan a ambos lados de la membrana celular y se atraen entre sí, generando también un poro [117].



**Figura 1.4.2** Representación esquemática del sistema de procesamiento de alimentos sólidos con pulsos eléctricos. Adaptado de [90].

Los efectos descritos pueden ser iniciados por el campo eléctrico pulsado (PEF), el de intensidad moderada y de alta intensidad [127]. El método más estudiado es el PEF [35].

Un esquema representativo que describe el PEF se muestra en la **Figura 1.4.2** [90, 124]. Durante el tratamiento PEF, se coloca un material entre dos electrodos y se aplica una corriente durante un periodo de tiempo muy corto, desde microsegundos hasta milisegundos [117]. Los electrodos pueden estar en dirección al alimento sólido (a través de placas metálicas o alambres) o el contacto a través de una solución electrolítica (NaCl) colocada en la cámara de procesado, lo que permite una mayor superficie de contacto entre la corriente eléctrica y el alimento sólido [119].

El aumento de la permeabilidad de la membrana celular producido por el PEF han sido de gran ayuda para mejorar los procesos de MT durante la deshidratación osmótica de los alimentos [33]. La **Tabla 1.4.2** muestra los resultados de los estudios que utilizan el PEF antes de la deshidratación osmótica en frutas y hortalizas. Estos demuestran que el pretratamiento con PEF mejora la tasa de MT, específicamente, el PEF ayuda a aumentar la pérdida de agua [80, 81, 118] y a reducir el tiempo de deshidratación osmótica [130].

La ganancia de solutos aumentó en algunos estudios [6, 129] y disminuyó en otros [80, 81, 117], con resultados que dependen del tipo de agente osmótico [119] o del número de pulsos [77]. Por lo tanto, el uso de pulsos eléctricos antes de la deshidratación osmótica es una buena alternativa para acelerar la tasa de MT, debido a que los pulsos eléctricos de alta intensidad aumentan el daño de las estructuras de la pared celular, obteniendo importantes reducciones en los tiempos de osmodeshidratación.



**Tabla 1.4.2** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por campo eléctrico pulsado.

Matriz	VARIABLES DE PROCESO	CONDICIONES DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA	CONCLUSIONES <sup>a</sup>	REFERENCIA
Arándano ( <i>Vaccinium oxycoccos</i> )	Intensidad del campo: 5.5 kV / cm Número de pulsos: 10 Intervalo entre pulsos: 2 s Frecuencia: 0.5 Hz	0.61 y 0.30 °Brix de sacarosa, 0.001g glicósidos de esteviol / g solución, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 4,320 min	El uso de PEF ayudó a acelerar la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica, además redujo el contenido de sacarosa en los productos finales	Nowacka <i>et al.</i> [81]
Blueberries ( <i>Vaccinium spp.</i> )	Intensidad del campo: 3 kV / cm 200 pulsos / s Duración del pulso: 1 µs Duración: 5 min Temperatura: 20 °C	0.70 g sacarosa y 0.00025 g de NaCl / g de producto, 2 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 200 rpm	El tratamiento con PEF redujo el tiempo de deshidratación osmótica de 130 a 48 h, asimismo incrementó la pérdida de agua y ganancia de solutos	Yu <i>et al.</i> [129]
Fresa var. Alba	Intensidad del campo: 0.1 - 0.4 kV / cm Duración del pulso: 100 µs Frecuencia: 100 Hz Temperatura: 25 °C Solución: NaCl	40 °Brix de sacarosa o tetralosa, 4 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 120 min	La aplicación de la intensidad de campo eléctrico más baja (100 V / cm) resultó suficiente para aumentar la pérdida de agua en un 12 % y 6 %, después de una hora de deshidratación osmótica, respectivamente, para las fresas deshidratadas en solución de sacarosa y tetralosa. El tratamiento de PEF incrementó la ganancia de solutos para los experimentos con sacarosa, pero con tetralosa se redujeron	Tylewicz <i>et al.</i> [119]
Kiwi var. Hayward, Actinidia deliciosa	Intensidad del campo: 0.1, 0.25 y 0.4 kV / cm Número de pulsos: 60 Intervalo entre pulsos: 100 µs Frecuencia: 100 Hz Tiempo de repetición: 10 ms Temperatura: 25 °C	61.5 °Brix de sacarosa, 4 g solución / g producto, 25 °C, 0 - 120 min	El tratamiento con PEF incrementa la pérdida de agua y reduce la ganancia de sacarosa durante la deshidratación osmótica	Traffano-Schiffo <i>et al.</i> [117]
Manzana	Intensidad del campo: 1, 1.5 y 2 kV / cm Número de pulsos: 8, 16 y 24 Duración del pulso: 0.02, 0.026 y 0.05 s Temperatura constante	50 °Brix de sacarosa, 20 g solución osmótica / g producto, 40°C, 140 rpm	La duración del pulso tiene el menor efecto en la pérdida de agua y ganancia de sólidos en comparación con la intensidad de campo y el número de pulsos. La aplicación de 8 - 16 pulsos durante el proceso DO-PEF incrementa los parámetros de transferencia de masa, pero a partir de 24 pulsos, estos se reducen	Nazari <i>et al.</i> [77]
Manzana Zanahoria Plátano	Intensidad del campo: 0.90 kV / cm. Número de pulsos: 750. Intervalo entre pulsos: 100 µs. Intensidad del campo: 0.30 kV / cm. Número de pulsos: 500 Intervalo entre pulsos: 100 µs. Intensidad del campo: 0.60 kV / cm. Número de pulsos: 500. Intervalo entre pulsos: 100 µs Temperatura: 60 y 80 °C	65 °Brix de sacarosa, 3 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 1,500 rpm	Durante la deshidratación osmótica, las muestras tratadas con PEF mostraron una mayor pérdida de agua (4 - 35 %) y ganancia de solutos (15 - 60 %) que las muestras sin tratar	Amami <i>et al.</i> [6]

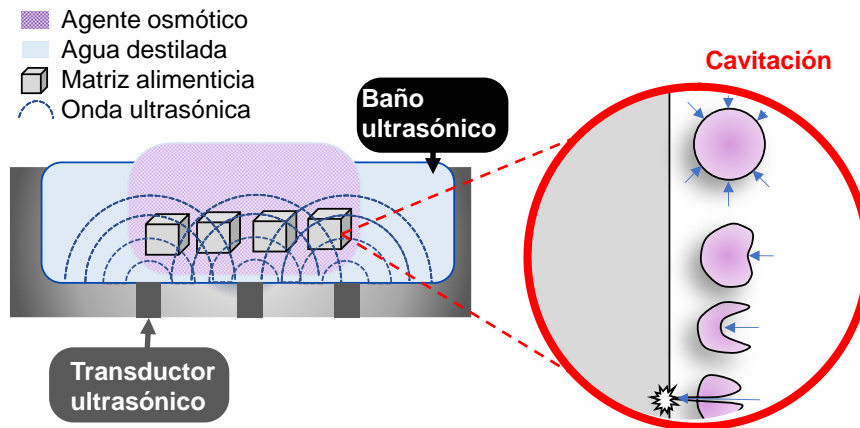
<sup>a</sup> PEF: Campo eléctrico pulsado, DO-PEF: deshidratación osmótica asistida por campo eléctrico pulsado

#### 1.4.4 Ultrasonidos y osmosonicación

El ultrasonido es un tipo de energía sonora emitida en ondas a frecuencias superiores a 20 kHz. Se clasifica en alta frecuencia (baja energía e intensidad, > 100 kHz) y baja frecuencia (alta energía e intensidad, 20 - 100 kHz) [44].

El ultrasonido a baja frecuencia produce cavitación (el desarrollo y posterior implosión de burbujas de gas), lo que da lugar a una serie de efectos en el alimento tratado, como la regulación del contenido enzimático (activación o inactivación), y la mejora de la tasa de MT y la transferencia de energía durante los procesos de secado, congelación y deshidratación [87]. El objetivo de la aplicación de ondas ultrasónicas antes de la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas es generar cambios útiles en la estructura celular que mejoren la MT. El tratamiento consiste en sumergir el alimento sólido en agua destilada (deshidratación osmótica asistida por ultrasonidos, US-OD) o en una solución osmótica cuya concentración es igual o inferior a la del proceso de deshidratación osmótica (osmosonicación) [15, 88].

Las ondas ultrasónicas (emitidas por un transductor de sonda o en un baño) se propagan entonces a través de este medio líquido (**Figura 1.4.3**). Durante el tratamiento se producen dos fenómenos: el "efecto esponja" (compresión y expansión del material) y la cavitación [79]. Las burbujas formadas por la cavitación implosionan (**Figura 1.4.3**), generando una presión en la superficie de la matriz alimentaria, lo que permite la eliminación de las partículas de agua fuertemente unidas y la creación de microcanales que mejoran la MT [71]. Nowacka *et al.* [78] demostraron que se necesitan al menos 10 min de tratamiento para la formación de microcanales.



**Figura 1.4.3** Representación esquemática del sistema de tratamiento de osmosonificación de alimentos y del colapso asimétrico de las burbujas de vapor provocado por los ultrasonidos. Adaptado de [71].

La **Tabla 1.4.3** muestra algunas aplicaciones de la deshidratación osmótica asistida por ultrasonidos y la osmosonificación de frutas y hortalizas. Se ha comprobado que el incremento de la frecuencia de los ultrasonidos y del tiempo de tratamiento reduce la  $a_w$  debido al aumento de la pérdida de agua [7, 15, 54], sin embargo, al principio del proceso se observa una "pérdida negativa" de agua (en otras palabras, el producto absorbe agua) y durante la US-OD puede producirse una "ganancia negativa de sólidos" debido a la lixiviación de estos [5, 41]. Sin embargo, se puede conseguir una ganancia de sólidos aumentando la frecuencia ultrasónica, la concentración de la solución osmótica (osmosonificación) y el tiempo del proceso [48, 78]. Además de los beneficios del proceso de deshidratación osmótica, los tratamientos con ultrasonidos ayudan a aumentar la impregnación de compuestos bioactivos, inactivar las enzimas y mejorar el color y la textura del producto final [48, 54, 88].

Por lo tanto, la osmodeshidratación se vuelve más rápida debido al uso de ultrasonidos y osmosonificación, que reducen el contenido inicial de agua o modifican la estructura del tejido celular de las frutas y hortalizas. Sin embargo, la elección del tratamiento ultrasónico depende principalmente de la interacción entre el medio osmótico y la muestra.

**Tabla 1.4.3** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por osmosonificación o ultrasonido.

Matriz	Tipo de tratamiento ultrasónico	Variables de proceso <sup>a</sup>	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones	Referencia
Arilos de granada	Osmosonificación	f = 25 y 40 kHz P = 100 W T = 30 °C t = 10 - 80 min	50 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C, 70 rpm	La pérdida de agua aumentó con el tiempo de sonicación. Las muestras a 25 kHz mostraron la mayor cantidad de solutos filtrados; la menor actividad del agua se alcanzó a 40 kHz	Allahdad <i>et al.</i> [5]
Caqui ( <i>Diospyros kaki</i> L.)	Osmosonificación	f = 35 kHz P = 480 W T = 30 °C t = 10, 20 y 30 min Medio: 45 °Brix de sacarosa	70 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C, 100 rpm	El tratamiento incrementó la pérdida de agua y ganancia de solutos; además esto se ve influenciado por el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica	Bozkir <i>et al.</i> [15]
Cranberry ( <i>Vaccinium oxycoccus</i> )	Osmosonificación	f = 35 y 130 kHz t = 10 - 80 min	40 - 60 °Brix sacarosa y 0 - 0.08 g NaOH / g solución, 10 g de solución osmótica / g, 25 °C, 150 rpm	El incremento de la frecuencia ultrasónica disminuyó la dureza y actividad de agua del producto	Shamaei, Emam-Djomeh y Moini [110]
	Osmosonificación y ultrasonido	f = 21 kHz P = 180 W (I = 3.6 W / g) t = 30 min Medio: 4 g agua / g producto	0.62 g sacarosa / g solución, 0.3 g sacarosa con 0.001 g glicósido de esteviol / g solución y 0.4 g trehalosa / g solución, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 4,320 min	Los parámetros de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica fueron influenciados por la aplicación de ultrasonido y osmosonificación; y por la actividad de agua de las soluciones osmóticas. La osmosonificación permitió obtener mayor pérdida de agua	Nowacka <i>et al.</i> [79]
Fresa var. <i>Camarosa</i>	Osmosonificación	f = 25 kHz P = 60 W T = 30 °C t = 10 - 45 min	25 y 50 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C	El pretratamiento con ultrasonido y la deshidratación osmótica mejoraron el color en las muestras de fresa, especialmente después de una exposición ultrasónica prolongada y la aplicación de altas concentraciones de sacarosa con el pretratamiento	García-Noguera <i>et al.</i> [48]
	Osmosonificación	f = 40 kHz I = 0.20 W / m <sup>2</sup> T = 20 - 40 °C t = 10, 20 y 30 min	32.5 y 65 °Brix de sacarosa, 20 - 40 °C	La pérdida de agua aumentó con el aumento del tiempo de sonicación; el corto tiempo de sonicación minimizó las pérdidas de color	Amami <i>et al.</i> [7]

Tabla 1.4.3. (continuación)

Matriz	Tipo de tratamiento ultrasónico	Variables de proceso <sup>a</sup>	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones	Referencia
Guayaba ( <i>Psidium guajava</i> )	Osmosonicación y ultrasonido	<b>Sonicación indirecta:</b> f = 0 - 25 kHz P = 1, 1.75 y 2.5 kW t = 20 - 60 min <b>Sonicación indirecta:</b> f = 20 kHz P = 400 W A = 15, 25 y 35 % t = 6 - 20 min	35 y 70 °Brix	La energía y amplitud del ultrasonido y el tiempo de osmosonicación incrementaron la pérdida de agua y ganancia de sólidos  La sonicación indirecta mostró mejor aceptación sensorial (color)	Kek <i>et al.</i> [54]
Melón ( <i>Cucumis melo</i> L.) var. <i>Cantalupensis Naud</i>	Osmosonicación y ultrasonido	f = 25 kHz I = 4870 W / m <sup>2</sup> T = 30 °C t = 10, 20 y 30 min	50 °Brix sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30°C	Al comienzo del proceso, la deshidratación osmótica asistida con ultrasonido presentó pérdidas de agua negativas (el producto absorbió agua) y la ganancia de sólidos incrementó respecto al tiempo de inmersión	Dias da Silva <i>et al.</i> [41]
Rebanadas de jengibre ( <i>Zingiber officinale Roscoe</i> )	Osmosonicación y ultrasonido	f = 33 kHz P = 600 W T = 30 °C t = 30 min <i>Para ultrasonido</i> Medio: 10 g agua / g producto <i>Para osmosonicación</i> Medio: 10 g solución osmótica / g producto	20 °Brix de sacarosa, 10 g solución osmótica / g producto, 30 °C	El tratamiento de osmosonicación ayuda a inactiva las enzimas polifenol oxidasa y peroxidasa	Osae <i>et al.</i> [88]
Zanahoria negra ( <i>Daucus carota</i> spp. <i>sativus</i> )	Osmosonicación	f = 37 kHz P = 550 W T = 40 °C t = 5, 10 y 15 min Medio: 45 °Brix de sacarosa	0.05, 0.1 y 0.15 g NaCl / g producto, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 125 rpm	La osmosonicación ayuda a la rotura de la estructura de los tejidos e incrementa la transferencia de masa	Sucheta, Chaturvedi, y Yadav [113]

<sup>a</sup> f: frecuencia ultrasónica; P: potencia; I: intensidad; T: temperatura; t: tiempo de tratamiento; A: amplitud de onda

## 1.5 Modelos y cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica

Al principio del proceso de deshidratación osmótica, cuando la diferencia de concentración entre los solutos en la solución osmótica y en la matriz del alimento es muy grande, la pérdida de agua es muy rápida. A medida que el agua pasa de la matriz alimentaria a la solución osmótica, esta diferencia de concentración (presión osmótica) se reduce, por lo que la tasa de MT se reduce hasta alcanzar un estado de equilibrio [70]. Durante la deshidratación osmótica, se produce un intercambio de agua y soluto, y el proceso puede evaluarse mediante los parámetros de pérdida de agua ( $WL$ ) y ganancia de soluto ( $SG$ ) [9] utilizando las siguientes Ecuaciones [5]:

$$WL = \frac{m_{w0} - m_{wDO}}{m_{p0}} \quad (1)$$

$$SG = \frac{m_s - m_{s0}}{m_{p0}} \quad (2)$$

donde  $WL$ , es la pérdida de agua del producto (g agua / g producto fresco),  $SG$ , ganancia de solutos (g soluto / g producto fresco);  $m_{w0}$ , masa de agua inicial (g);  $m_{wDO}$ , masa de agua del producto osmodeshidratado (g);  $m_{p0}$ , masa del producto fresco (g),  $m_s$ , masa del producto osmodeshidratado seco;  $m_{s0}$ , masa del producto fresco seco (g).

Los modelos de MT para la deshidratación osmótica generalmente ignoran el flujo de soluto de la matriz alimentaria, ya que es muy pequeño comparado con el  $WL$  y el  $SG$  [89]. Los modelos que permiten predecir la cinética de  $WL$  y  $SG$  se clasifican en empíricos, semiempíricos, mecanísticos y fenomenológicos [75]. En la **Tabla 1.5.1**, se presentan algunos modelos utilizados para describir estas tendencias de proceso (curvas).

**Tabla 1.5.1** Modelos matemáticos usados para describir la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas.

Nombre	Modelo Ecuación <sup>a</sup>	Descripción	Referencia
<b>Modelos empíricos y semiempíricos</b>			
Modelo de Azuara	$WL = \frac{s_1 \cdot t \cdot WL_e}{1 + s_1}$ $GS = \frac{s_2 \cdot t \cdot SG_e}{1 + s_2}$	$s_1, s_2$ , constantes de velocidad relativa a la $WL$ y $SG$	Azuara <i>et al.</i> [12]
Modelo de Peleg	$WL = WL_0 \pm \frac{t}{k_{1,A} + t \cdot k_{2,A}}$ $SG = SG_0 \pm \frac{t}{k_{1,S} + t \cdot k_{2,S}}$	$k_{1,A}, k_{1,S}$ , constantes de velocidad ( $s \cdot kg$ de sólidos secos / $kg$ de agua); $k_{2,A}, k_{2,S}$ , constantes de capacidad ( $kg$ de sólidos secos / $kg$ de agua); $WL_0, SG_0, WL$ y $SG$ al inicio del proceso	Peleg [92]
Modelo de Page	$\frac{WL}{WL_e} = 1 - \exp[-\alpha_A t^{\beta_A}]$ $\frac{SG}{SG_e} = 1 - \exp[-\alpha_S t^{\beta_S}]$	$\alpha_A, \alpha_S$ , constantes asociadas a $WL$ y $SG$ $\beta_A, \beta_S$ , constantes de Page para $WL$ y $SG$	Alam <i>et al.</i> [3]
Modelo de Weibull	$\frac{WL}{WL_e} = 1 - \exp\left[\frac{t}{\gamma_A}\right]^{\delta_A}$ $\frac{SG}{SG_e} = 1 - \exp\left[\frac{t}{\gamma_S}\right]^{\delta_S}$	$\gamma_A, \gamma_S, \delta_A, \delta_S$ , parámetros asociados al modelo de Weibull	Pei <i>et al.</i> [91]
<b>Modelos fenomenológicos obtenidos de la segunda ley de Fick</b>			
Solución analítica de Crank	$\psi_i = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_i \times t}{4 l^2}\right]$ $\psi_i = \frac{8^3}{\pi^6} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[(2n+1)^2 \frac{3\pi^2 D_i \times t}{4 l^2}\right]$ $\psi_i = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n^2} \exp\left[-\alpha_n^2 \frac{D_i \times t}{r_c^2}\right]$ $\psi_i = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[n^2 \frac{D_i \times t}{r^2}\right]$	<p>Geometría: placa plana; <math>l</math>, longitud característica (m); <math>D_i</math>, difusividad de transferencia de masa (<math>m^2 / s</math>); <math>i = A</math> o <math>S</math>; <math>A =</math> agua; <math>S =</math> solutos; <math>\psi_{i=A} = 1 - WL_e / WL</math>; <math>\psi_{i=S} = 1 - SG_e / SG</math>; <math>n</math>, número de nodos</p> <p>Geometría: cúbica; <math>l</math>, longitud característica (m); <math>D_i</math>, difusividad de transferencia de masa (<math>m^2 / s</math>); <math>i = A</math> o <math>S</math>; <math>A =</math> agua; <math>S =</math> solutos; <math>\psi_{i=A} = 1 - WL_e / WL</math>; <math>\psi_{i=S} = 1 - SG_e / SG</math>; <math>n</math>, número de nodos</p> <p>Geometría: cilíndrica; <math>r_c</math>, radio (m); <math>t</math>, tiempo (s); <math>D_i</math>, difusividad de transferencia de masa (<math>m^2 / s</math>); <math>i = A</math> o <math>S</math>; <math>A =</math> agua; <math>S =</math> solutos; <math>\psi_{i=A} = 1 - WL_e / WL</math>; <math>\psi_{i=S} = 1 - SG_e / SG</math>; <math>n</math>, número de nodos</p> <p>Geometría: esférica; <math>r</math>, radio (m); <math>t</math>, tiempo (s); <math>D_i</math>, difusividad de transferencia de masa (<math>m^2 / s</math>); <math>i = A</math> o <math>S</math>; <math>A =</math> agua; <math>S =</math> solutos; <math>\psi_{i=A} = 1 - WL_e / WL</math>; <math>\psi_{i=S} = 1 - SG_e / SG</math>; <math>n</math>, número de nodos</p>	Muñiz-Becerá <i>et al.</i> [75]

Tabla 1.5.1. (continuación)

Nombre	Modelo Ecuación <sup>a</sup>	Descripción	Referencia
<i>Modelos mecánicos</i>			
Modelo de Toupin <i>et al.</i>	<p>Transporte transmembrana (MT a través del plasmalema)</p> $J_{jm} = \left  \sum_k^m L_{kjm} \Delta\mu_{km} \right $ <p>Transporte sin membrana (MT a través de los plasmodesmos)</p> $J_{jp} = \left  \sum_k^m L_{kjp} \Delta\mu_{kp} \right $ <p>Potencial químico <math>\Delta\mu = RT \Delta \ln a_t + v \Delta P</math></p> <p>Transporte intercelular de especies j</p> $\frac{\partial \rho_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_j \frac{\partial \rho_j}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho_j u) - \rho_j \frac{\partial V_1}{\partial t} - \frac{A_m}{V_1} (J_{jm} + J_{jp})$	<p><math>J_{jm}, J_{jp}</math> son el flujo de transporte a través del plasmalema y el flujo de transporte simplástico de la especie j (agua o soluto), respectivamente; <math>L_{kjm}</math> y <math>L_{kjp}</math>, coeficiente fenomenológico macroscópico (describen la característica de permeabilidad de la membrana al soluto j y la diferencia de potencial químico del agua y los solutos a través de la membrana); <math>\Delta\mu_{km}</math> y <math>\Delta\mu_{kp}</math> son las diferencias de potencial químico de las especies k entre las soluciones celular y extracelular o entre la solución dentro de una célula y la célula vecina, respectivamente; R es la constante universal de los gases; T, es la temperatura absoluta del sistema; en la actividad de las especies j; v, volumen molar parcial; <math>\Delta P</math>, presión resultante de los potenciales estático, osmótico y matricial; <math>\rho_j</math>, la concentración de masa de las especies j; <math>V_1</math>, volumen intercelular; <math>A_m</math>, superficie de la membrana; u, velocidad media</p>	Toupin <i>et al.</i> [116]
Modelo de Seguí <i>et al.</i>	<p>El flujo de agua molar transmembrana</p> $J_{wm} = \sum_N \frac{J_w^P}{N}$ <p>Permeabilidad (basada en el mecanismo de difusión)</p> $J_w^P = -\frac{D_{ew}}{d_{PM}} \frac{P}{R_g T} (x_w^{EP} - x_w^{IP})$ <p>Transporte de agua a través del plasmalema</p> $J_w^P = -L_{wm} RT \ln \left( \frac{a_w^{EP}}{a_w^{IP}} \right)$	<p><math>J_{wm}</math>, flujo de agua transmembrana; <math>J_w^P</math>, flujo de agua a través del plasmalema; N, número de sumandos; <math>D_{ew}/d_{PM}</math> (difusividad efectiva del agua / espesor del plasmalema), permeabilidad; <math>x_w^{EP}</math> y <math>x_w^{IP}</math>, fracción molar de agua dentro y fuera del protoplasto, respectivamente; <math>L_{wm}</math>, coeficiente fenomenológico del agua a través del plasmalema; R, constante universal de los gases (J / mol K); T, temperatura (K); <math>a_w^{EP}</math> y <math>a_w^{IP}</math> son la actividad del agua dentro y fuera del protoplasto, respectivamente</p>	Seguí <i>et al.</i> [108]



**Tabla 1.5.1.** (continuación)

Nombre	Modelo Ecuación <sup>a</sup>	Descripción	Referencia
Modelo de Yao y Le Maguer	<p>Volumen libre (volumen libre del tejido y el vacío dentro de la pared celular)</p> $\frac{\partial(\rho_i^f A^f)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( A^f D_i^f \frac{\partial \rho_i^f}{\partial z} \right) - \frac{\partial(\rho_i^f v^f A^f)}{\partial z} + J_i E$ $\frac{\partial(v^f A^f)}{\partial z} = \sum_{i=1}^k (J_i v_i) E - \frac{\partial A^f}{\partial t}$ <p>Volumen intercelular</p> $\frac{\partial(\rho_i^c A^c)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho_i^c v^c A^c)}{\partial z} - J_i E$ $\frac{\partial(v^c A^c)}{\partial z} = - \sum_{i=1}^k (J_i v_i) E - \frac{\partial A^c}{\partial t}$ <p>Volumen de la fibra de la pared celular</p> $\frac{\partial A^w}{\partial t} = - \frac{\partial(v^w A^w)}{\partial z} = - \frac{\partial(v^c A^w)}{\partial z}$	<p><math>A</math> es el área de la sección transversal de la muestra (<math>m^2</math>); <math>D_i</math>, coeficiente de difusión aparente (<math>m^2/s</math>); <math>v</math> es la velocidad media del volumen (<math>m/s</math>); <math>J</math>, dimensión del flujo transmembrana del modelo y <math>E</math> es la dimensión del modelo en la dirección <math>y</math>. Los superíndices <math>c, f</math> y <math>w</math> distinguen el volumen intercelular, el volumen libre y el volumen de las fibras de la pared celular, respectivamente. El subíndice <math>i</math> corresponde a uno de los componentes <math>k</math> presentes en la solución y el volumen libre</p>	Yao y Le Maguer [126]
Modelo de mecanismo hidrodinámico	$-\Delta P + \frac{32\mu z_L^2}{d^2} X_v \frac{dX_v}{dt} = 0$ $X = \varepsilon_e X_v$	<p><math>\Delta P</math>, gradiente de presión; <math>\mu</math>, viscosidad del líquido; <math>z_L</math> y <math>d</math> son la longitud y el diámetro del poro (representado como geometría cilíndrica), respectivamente; <math>X_v</math>, penetración de la fracción volumétrica del poro ocupada por el líquido; <math>\varepsilon_e</math>, porosidad efectiva; <math>X</math>, volumen total de alimento ocupado por el gas</p>	Fito [46]

<sup>a</sup>  $WL$ , pérdida de agua (g agua / g producto fresco);  $SG$ , ganancia de solutos (g solutos / g producto fresco);  $t$ , tiempo de inmersión (s);  $WL_e$  (g agua / g producto fresco),  $SG_e$  (g solutos / g producto fresco),  $WL$  y  $SG$  en el equilibrio.

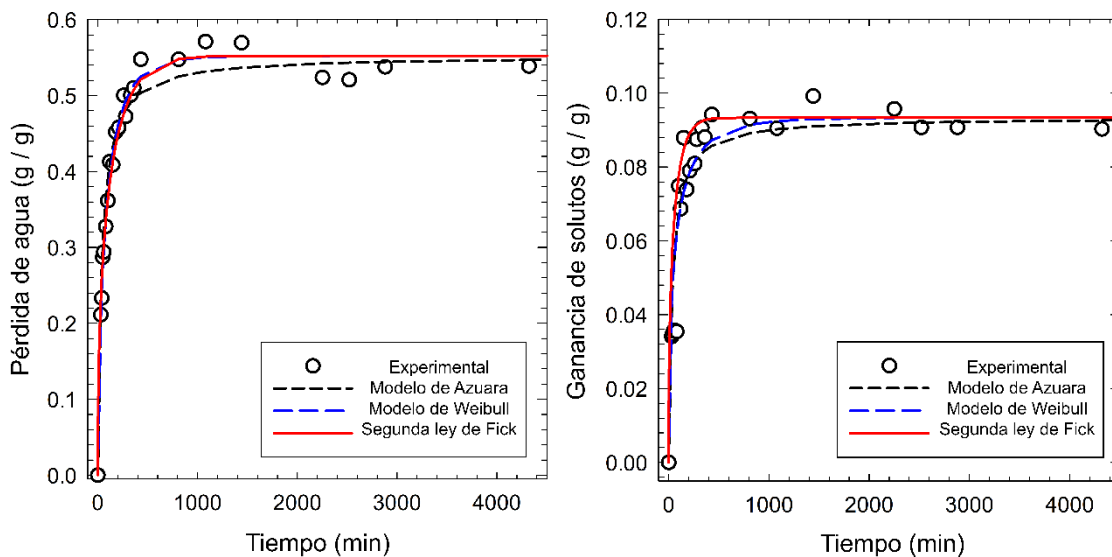
Los modelos empíricos y semiempíricos como los reportados en la **Tabla 1.5.1**, el modelo de Azuara [12], el modelo de Peleg [92], el modelo de Page [3], y el modelo de Weibull [91], dependen de las condiciones experimentales ya que sólo son válidos para las condiciones en las que fueron calculados. Además, pueden aplicarse a geometrías no clásicas, y algunos de ellos permiten la predicción de valores de equilibrio con pocos puntos experimentales de la cinética de deshidratación osmótica [3, 12], por lo que generalmente se utilizan para calcular el estado de equilibrio para resolver algunos modelos fenomenológicos. Los modelos mecanísticos ayudan a estimar la tasa de MT del agua y los solutos en los alimentos considerando los flujos de la MT en las características de la membrana celular.

Sin embargo, esos modelos requieren de muchas propiedades biofísicas no disponibles, como la permeabilidad de la membrana celular, el módulo elástico, la porosidad (definida como la relación entre el volumen libre y el volumen total del tejido), o la tortuosidad (establece la equivalencia en longitud entre el camino a través del volumen libre extracelular y la medida de la distancia desde la superficie del producto) de la pared celular [53]. Algunos modelos utilizan una forma ampliada de la segunda ley de Fick para describir el transporte intercelular de agua y solutos, y la termodinámica del proceso irreversible para el transporte transmembrana y simplástico, como el modelo de Toupin. Este modelo describe los flujos de agua y solutos (transporte transmembrana y simplástico) en estructuras celulares complejas considerando las características de la membrana celular (como las características de permeabilidad, las diferencias de potencial químico de las especies entre las soluciones celulares y extracelulares) [116]. Algunas características de la membrana de las frutas y las hortalizas pueden obtenerse a partir de datos publicados o experimentales [68]. Seguí *et al.* [108] propusieron un modelo mecanístico que analiza la fuerza motriz que promueve la MT del agua debido a la diferencia de concentración o de potencial químico. Este modelo ha sido utilizado para obtener el flujo de agua transmembrana y para determinar la permeabilidad. Yao y Le Maguer [126] desarrollaron un modelo mecanístico que considera la MT intracelular y extracelular a través de una membrana semipermeable. El modelo incorpora la difusión, el flujo de masa, el flujo transmembrana y el encogimiento de la matriz. Fito [46] propuso un modelo mecanístico para describir la MT durante la deshidratación osmótica bajo vacío, que se conoce como modelo de mecanismo hidrodinámico (HDM). El HDM considera la porosidad (los poros se representan como un cilindro de diámetro y longitud constantes) y la deformación (causada por la presión del vacío) de la estructura del tejido. Estas características estructurales se utilizaron para determinar la MT líquida en el producto durante la deshidratación osmótica bajo presión de vacío. En general, los modelos mecanicistas son capaces de describir teóricamente el proceso de MT teniendo en cuenta las características del tejido celular. Sin embargo, la aplicación de algunos modelos mecanicistas ha sido muy limitada porque no todos los parámetros requeridos (como las características de los tejidos celulares de algunas frutas y hortalizas) se reportan en la literatura.

Los modelos fenomenológicos utilizan geometrías clásicas y suelen basarse en la segunda ley de Fick para representar el mecanismo de difusión [11]. Este modelo requiere estimar la pérdida de agua y la ganancia de soluto en el equilibrio. La estimación del parámetro de equilibrio puede ser datos experimentales o condiciones de equilibrio ajustadas por el modelo de Azuara o Peleg [19, 94]. La segunda ley de Fick se resuelve por métodos analíticos (solución de Crank) o numéricos (como elementos finitos, diferencias finitas, volúmenes finitos, que se resuelven utilizando diferentes herramientas computacionales) con varias condiciones iniciales y de frontera de la **Tabla 1.5.1** [131]. Las soluciones analíticas de Crank para diferentes geometrías (**Tabla 1.5.1**) se desarrollaron considerando lo siguiente: la transferencia de material es predominantemente unidimensional de la geometría (característica de la forma del producto), el contenido de humedad inicial se distribuye uniformemente en el producto, la concentración y la temperatura de la solución osmótica son constantes en todo el proceso, el encogimiento del producto es insignificante, el coeficiente de difusión no cambia durante el proceso y la resistencia externa a la MT es insignificante en la superficie del producto [28].

Los datos experimentales no publicados de la pérdida de agua y la ganancia de solutos de cubos ( $1.5 \times 1.5 \times 1.5$  cm) de pera (var. *Green Anjou*) osmodeshidratados con jugo concentrado de uva (**Figura 1.5.1**) se utilizaron para ilustrar el ajuste de algunos de los modelos presentados en la **Tabla 1.5.1**. El proceso de osmodeshidratación consistió en la inmersión de cubos de pera fresca ( $a_w = 0.988 \pm 0.000$ ) en jugo de uva concentrado (50 °Brix,  $a_w = 0.891 \pm 0.002$ ), a 40 °C y 10 g de solución osmótica / g de producto fresco (para evitar una dilución excesiva). Los modelos utilizados fueron los reportados por [12], el modelo de Weibull [91], y la solución analítica de Crank [75] correspondiente a una geometría cúbica (las condiciones experimentales permiten cumplir con las consideraciones requeridas para utilizar estos modelos). El valor del parámetro de equilibrio estimado con el modelo de Azuara se utilizó en el modelo de Weibull y en la solución analítica de Crank. Los parámetros de los modelos se estimaron mediante regresión no lineal. El coeficiente de determinación ( $R^2$ , para determinar el ajuste del modelo) y el cuadrado mínimo de error (RMSE) fueron usados para evaluar la bondad del ajuste. Los parámetros del modelo de Azuara para el proceso de deshidratación fueron  $WL_e = 0.552$  g de agua / g de producto fresco y  $s_1 = 0.0004$  1 / s ( $R^2 = 0.977$  y RMSE = 0.0232) y para el proceso de impregnación

fueron  $SG_e = 0.0934$  g de solutos / g de producto fresco y  $s_2 = 0.00043$  1 / s ( $R^2 = 0.90$  y  $RMSE = 0.0096$ ). Los parámetros de equilibrio estimados con el modelo de Azuara fueron similares a los valores de equilibrio experimentales, lo que implica que la predicción de los parámetros de equilibrio es de gran ayuda cuando se desconoce el estado de equilibrio experimental. Algunos autores han utilizado modelo de Azuara para determinar los valores de  $WL_e$  y  $SG_e$  [10, 72]. Los parámetros de pérdida de agua del modelo de Weibull fueron  $\gamma_w = 5.271 \times 10^3$  s y  $\delta_w = 0.6951$  ( $R^2 = 0.988$  y  $RMSE = 0.0148$ ), y los parámetros de ganancia de soluto del modelo fueron  $\gamma_s = 4.164 \times 10^3$  s y  $\delta_s = 0.548$  ( $R^2 = 0.895$  y  $RMSE = 0.0097$ ). Algunos autores relacionan  $\delta_w$  y  $\delta_s$  con la velocidad de la MT al inicio del proceso (valores bajos del parámetro indican una mayor velocidad de la MT [95]). La difusividad del agua fue de  $4.36 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> / s ( $R^2 = 0.987$  y  $RMSE = 0.0150$ ), y la del soluto fue de  $3.57 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> / s ( $R^2 = 0.902$  y  $RMSE = 0.009$ ). Los datos experimentales fueron descritos adecuadamente por los modelos analizados. El modelo de Weibull y la solución analítica de Crank mostraron los mejores ajustes para los procesos de pérdida de agua, y para los procesos de ganancia de solutos, el mejor ajuste fue con la segunda ley de Fick ya que tuvieron los valores más altos de  $R^2$  y los valores de  $RMSE$  más bajos.



**Figura 1.5.1** Evolución experimental (puntos) y ajustado (líneas) evolución de deshidratación e impregnación de cubos de pera osmódeshidratados con concentrado de uva (a 50 °Brix, 10 g de solución osmótica / g de producto y 40 °C).

En la **Tabla 1.5.2** se presentan algunos ejemplos de difusividad del MT en frutas y hortalizas sometidas a deshidratación osmótica asistida por pulsos de vacío, altas presiones hidrostáticas, PEF y osmosonificación. Se observa un aumento de la difusividad del MT cuando la deshidratación osmótica es asistida por estos métodos no térmicos. También se observan aumentos en la difusividad de la MT con soluciones osmóticas que utilizan un soluto de menor peso molecular [29], con aumentos en la concentración del soluto en la solución osmótica [30, 49], o con aumentos en la intensidad / severidad de la TNT (HHP y PEF) [29, 40, 66, 112].

**Tabla 1.5.2** Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a un proceso de deshidratación osmótica asistida por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmosonificación

Matriz (geometría)	Condición de proceso		Difusividad $\times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)			Referencias	
	Tratamiento	Deshidratación osmótica	Agua / Solutos				
<b>Altas presiones hidrostáticas, HHP</b>							
Jengibre ( <i>Zingiber officinale</i> ) en rebanadas (placa infinita)	Presión: 200 - 600 MPa Tiempo de proceso: 0.25 - 15 min	Agente osmótico: glucosa, fructosa y sacarosa Concentración de agente osmótico: 60 °Brix Relación agente osmótico/ matriz alimenticia: 4 g / g Temperatura: 40 °C	0.322 / 0.362 / 0.396 / 2.277 - 3.725 / 2.618 - 4.027 / 2.890 - 4.293	/ / / / / /	0.199 / 0.165 / 0.396 / 1.730 - 2.608 / 1.483 - 2.291 / 1.283 - 4.293	glucosa / fructosa / sacarosa / glucosa, HHP / fructosa, HHP / sacarosa, HHP	Dash <i>et al.</i> [29]
Manzana var. Fuji en rebanadas (placa infinita)	Presión: 400 MPa Tiempo de proceso: 10 min	Agente osmótico: jarabe de kokum (kk) y solución de sacarosa y kokum (ss-kk) Concentración de agente osmótico: 10, 30 y 50 °Brix Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 3 g / g Temperatura: 40 °C	1.58 / 1.48 - 4.84 / 2.13 / 2.63 - 19.20	/ / / /	0.22 / 0.23 - 1.91 / 0.23 / 0.25 - 2.97	kk / kk-ss / kk, HHP / kk-ss, HHP	George <i>et al.</i> [49]
Wumei en cilindros, <i>Prunus mume</i> Siebet Zucc (cilindro infinito)	Presión: 50, 100, 200 y 400 MPa Tiempo de proceso: 10 min	Agente osmótico: sacarosa Concentración de agente osmótico: 40 °Brix Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 20 g / g Temperatura: 22 °C Tiempo: 360 min	0.153 / 0.268 - 0.376	/ /	- / -	sin tratamiento / HHP	Luo <i>et al.</i> [66]
<b>Pulsos de vacío, VP</b>							
Berenjena en rebanadas, <i>Solanum melongena</i> L. (placa infinita)	Presión de vacío: 108.8 mmHg Tiempo: 10 min	Agente osmótico: 10 % NaCl; 7.5 % NaCl+2.5 % KCl; 7 % NaCl+2.5 % KCl+0.5 % CaCl <sub>2</sub> (1); y 5 % NaCl+4.0 % KCl+1.0 % CaCl <sub>2</sub> (2) Relación agente osmótico/ matriz alimenticia: 10 g / g Temperatura: 30 °C Tiempo: 10 - 360 min	0.434 / 0.459 / 0.453 / 0.411 / 0.504 / 0.546 / 0.533 / 0.499	/ / / / / / / /	0.255 / 0.257 / 0.312 / 0.305 / 0.325 / 0.287 / 0.355 / 0.111	NaCl / NaCl:KCl / NaCl:KCl:CaCl <sub>2</sub> (1) / NaCl:KCl:CaCl <sub>2</sub> (2) / NaCl-PV / NaCl:KCl-VP / NaCl:KCl:CaCl <sub>2</sub> (1)-VP / NaCl:KCl:CaCl <sub>2</sub> (2)-VP	de Jesus Junqueira <i>et al.</i> [31]
Manzana var. Granny Smith en rebanadas (placa infinita)	Presión de vacío: 0.0114 MPa (85.4 mmHg) Tiempo: 20 min	Agente osmótico: 9 g sacarosa / g de emulsión W <sub>1</sub> / O / W <sub>2</sub> (se formó una emulsión de agua en aceite con 9.98 $\times 10^8$ UFC de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> LC705 / mL y 62 g de aceite de semilla de uva; finalmente, se dispersaron 30 g de emulsión W <sub>1</sub> /O en 70 g de solución de concentrado de proteína de suero de leche al 14 %) Concentración de agente osmótico: 40 - 60 °Brix Relación agente osmótico/ matriz alimenticia: 20 g / g Tiempo: 320 min	0.163 - 0.241 / 0.239 - 0.301	/ /	0.57 - 0.744 / 0.853 - 1.548	sin tratamiento / VP	Flores-Andrade <i>et al.</i> [47]

Tabla 1.5.2. (continuación)

Matriz (geometría)	Condición de proceso		Difusividad×10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> /s)			Referencias	
	Tratamiento	Deshidratación osmótica	Agua / Solutos				
<b>Campo eléctrico pulsado, PEF</b>							
Manzana de la var. <i>Jonagold</i> en forma de disco (disco infinito)	Intensidad de campo: 800 V / cm Número de pulsos: 10 Duración del pulso: 100 µs Intervalo entre pulsos: 100 ms Tiempo de relajación: 10 s Consumo específico de energía: 12 kJ / kg Temperatura constante	Agente osmótico: 0.20 y 0.60 g glicerol / g jugo de manzana Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 20 g / g Temperatura: 20 °C Tiempo: 180 min	0.50 - 0.35	/	0.31 - 0.69	PEF	Parniakov <i>et al.</i> [90]
Kiwi de la var. <i>Hayward</i> en rebanadas (placa infinita)	Intensidad de campo: 70, 110 y 180 V / cm Número de pulsos 250 Duración del pulso: 15 µs Frecuencia: 300 Hz Consumo específico de energía: 816.6 y 42.3 kJ / kg Temperatura: 20 °C	Agente osmótico: 0.30 g de glicerol, 0.10 g de tetralosa, 0.20 g de maltodextrina, 0.1 g CaCl <sub>2</sub> y 0.002 g de ácido cítrico / g solución Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 5 g / g Temperatura: 25 – 45 °C Tiempo: 240 min	0.323 - 1.13 0.653 - 1.87	/	1.25 - 1.81 1.51 - 2.90	Sin tratamiento PEF	Dermesonlou oglou <i>et al.</i> [40]
Manzana de la var. <i>Golden delicious</i> en rodajas (prisma rectangular)	Pretratamiento eléctrico Intensidad de campo: 20 - 32 V / cm Tiempo de aplicación: 10 - 30 s Temperatura: 30 °C	Agente osmótico: sacarosa Concentración de agente osmótico 50 °Brix Temperatura: 40 °C Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 15 g / g Velocidad de agitación: 180 rpm	0.0132 0.124 - 0.262	/	0.271 0.101 - 0.277	Sin tratamiento PEF-moderado	Yildiz <i>et al.</i> [127]
Manzana de la var. <i>Granny Smith</i> en <i>sheets</i> (cilindro)	Intensidad de campo: 9, 13 y 17 V / cm Voltaje: 70-130 V Temperatura: 40 °C	Agente osmótico: sacarosa con sorbato de potasio y CaCl <sub>2</sub> Concentración de agente osmótico: 45 – 65 °Brix y 7 mg de sorbato de potasio / L y 1.27 - 1.13 g CaCl <sub>2</sub> / L Temperatura: 40 °C Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 11 g / g	0.148 - 0.181 0.163 - 0.514	/	- -	Sin tratamiento PEF	Simpson <i>et al.</i> [112]

Tabla 1.5.2. (continuación)

Matriz (geometría)	Condición de proceso		Difusividad×10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> /s)			Referencias	
	Tratamiento	Deshidratación osmótica	Agua / Solutos				
<i>Osmosonificación, OUS</i>							
Ciruelas de la var. <i>Victoria</i> en mitades (semiesfera)	Frecuencia: 25 kHz	Agente osmótico: glucosa y sacarosa	-	/	17.3	glucosa y sacarosa	Rahaman <i>et al.</i> [97]
	Tiempo: 30 y 60 min	Concentración de agente osmótico: 0.50 g (glucosa o sacarosa) / g solución Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 4 g / g Temperatura: 30 °C Tiempo: 180 min	-	/	17.1 - 19.2 18.5 - 18.6	glucosa, OUS sacarosa, OUS	
Pepino (cubos)	Frecuencia: 30 y 70 %	Agente osmótico: maltodextrina y NaCl	0.004 -	/	0.005 -	OUS	Kiani <i>et al.</i> [56]
	Tiempo: 20 y 60 min	Concentración de agente osmótico: 0.565 g maltodextrina, 0.05 o 0.045 g NaCl / g solución Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 5 g / g Temperatura: 25 °C	0.012		0.012		
Rebanadas de champiñón, <i>Agaricus</i> <i>bisporus</i> (placa infinita)	Frecuencia: 40 kHz	Agente osmótico: sacarosa, glucosa y NaCl	0.641 -	/	0.491 -	sacarosa, OUS	Pei <i>et al.</i> [91]
	Energía: 200 W	Concentración de agente	0.776		0.551		
	Temperatura: 30 °C	osmótico: 0.40-0.60 g (sacarosa o glucosa) / g solución	0.703 -	/	1.038 -	glucosa, OUS	
	Tiempo: 15 - 75 min	0.10-0.20 g NaCl / g solución Relación agente osmótico / matriz alimenticia: 10 g / g	0.908 1.291 - 1.948	/	1.111 - 0.611 - 0.667	NaCl, OUS	



## 1.6 Conclusiones y comentarios finales

Se han reportado varios avances que involucran una serie de parámetros del proceso en relación con los intentos de aumentar la tasa de MT durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas, incluyendo métodos no térmicos, modelos matemáticos y cinética del proceso. La mayoría de los estudios indican que la selección adecuada de los parámetros óptimos del proceso, como el tiempo, la temperatura, la concentración del agente osmótico o el tipo de TNT, puede beneficiar a la calidad del producto y aumentar la MT. Además, el uso de TNT y diferentes condiciones de proceso puede proporcionar un control de la concentración de solutos en los productos resultantes. Se han desarrollado diferentes modelos matemáticos para describir los parámetros (pérdida de agua y ganancia de solutos) del proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas. Los modelos mecanicistas consideran características microscópicas que podrían acercarse a las variaciones de la MT debido a las variaciones de la pared celular. Sin embargo, este tipo de modelos requiere muchos más datos experimentales de las características microscópicas de la matriz, lo que limita su aplicación. La segunda ley de Fick y los modelos de Azuara o Page son los enfoques macroscópicos más utilizados para representar adecuadamente los fenómenos de la MT de forma simplificada durante la TNT y / o bajo diferentes condiciones de proceso. Aunque estas tecnologías son prometedoras para producir productos osmodeshidratados de alta calidad nutricional, no hay estudios que informen de la aplicación de estos métodos no térmicos con agentes osmóticos más complejos (como los concentrados de frutas y hortalizas). Asimismo, se requieren más estudios para escalar estos procesos a nivel industrial.

### *Agradecimientos*

El autor González-Pérez recibió apoyo financiero para sus estudios de doctorado de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México.

## Referencias

1. Ahmed I, Qazi IM, Jamal S (2016) Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innov Food Sci Emerg Technol* 34:29–43. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.003>
2. Akharume F, Smith A, Sivanandan L, Singh K (2019) Recent progress on osmo-convective dehydration of fruits. *SDRP J Food Sci Technol* 4(9):956–969. <https://doi.org/10.25177/JFST.4.9.RA.613>
3. Alam MS, Kaur M, Ramya HG (2019) Mass transfer kinetics for osmotic dehydration of kinnow fruit in sugar solution. *Proc Natl Acad Sci India Sect B Biol Sci* 89(1):361–370. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0951-z>
4. Alfaro L, Siramard S, Chouljenko A, Sathivel S (2018) Effects of liquid nitrogen pretreatment on the osmotic dehydration and quality of cryogenically frozen blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.). *Food Biosci* 22:165–169. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.02.006>
5. Allahdad Z, Nasiri M, Varidi M, Varidi MJ (2019) Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *J Food Eng* 244:202–211. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017>
6. Amami E, Khezami L, Jemai AB, Vorobiev E (2014) Osmotic dehydration of some agro-food tissue pre-treated by pulsed electric field: impact of impeller's Reynolds number on mass transfer and color. *J King Saud Univ Eng Sci* 26(1):93–102. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2012.10.002>
7. Amami E, Khezami W, Mezrigui S, Badwaik LS, Bejar AK, Perez CT, Kechaou N (2017) Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrason Sonochem* 36:286–300. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.007>
8. An K, Tang D, Wu J, Fu M, Wen J, Xiao G, Xu Y (2019) Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale Roscoe*): drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles. *Food Sci Nutr* 7(8):2537–2545. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1103>

9. Assis FR, Morais RMSCD, Morais AMMBD (2018) Mathematical modelling of the osmotic dehydration of physalis. *Brazilian J Food Technol* 21(0). <https://doi.org/10.1590/1981-6723.10217>
10. Assis FR, Morais RMSC, Morais AMMB (2017) Mathematical modelling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes. *J Food Process Preserv* 41(3):1–16. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.10217>
11. Assis FR, Morais RMSC, Morais AMMB (2016) Mass transfer in osmotic dehydration of food products: comparison between mathematical models. *Food Eng Rev* 8(2):116–133. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9123-1>
12. Azuara E, Beristain C, García H (1992) Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *J Food Sci Tech* 29:239–242
13. Barbosa de Lima AG, da Silva JV, Pereira EMA, dos Santos IB, de Lima WMPB (2016) Drying of bioproducts: quality and energy aspects. In J. M. P. Q. Delgado & A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and Energy Technol* (Vol. 63, pp. 1–18). Springer International Publishing [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_1)
14. Bera D, Roy L (2015) Osmotic dehydration of litchi using sucrose solution: effect of mass transfer. *J Food Process Technol* 06(07). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000462>
15. Bozkir H, Rayman Ergün A, Serdar E, Metin G, Baysal T (2019) Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrason Sonochem* 54:135–141. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.02.006>
16. Brochier B, Marczak LDF, Noreña CPZ (2015) Osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes: water effective diffusivity evaluation. *Food Bioproc Tech* 8(3):623–636. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1432-5>
17. Calín-Sánchez Á, Kharaghani A, Lech K, Figiel A, Carbonell Barrachina ÁA, Tsotsas E (2015) Drying kinetics and microstructural and sensory properties of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as affected by drying method. *Food Bioproc Tech* 8(1):63–74. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1383-x>
18. Cano-Lamadrid M, Lech K, Michalska A, Wasilewska M, Figiel A, Wojdyło A, Carbonell-Barrachina ÁA (2017) Influence of osmotic dehydration pre-treatment

- and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar *Mollar de Elche*. *Food Chem* 232:306–315. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.033>
19. Chambi HNM, Lima WCV, Schmidt FL (2016) Osmotic dehydration of yellow melon using red grape juice concentrate. *Food Sci Tech* 36(3):468–475. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.01416>
  20. Chandra S, Kumari D (2015) Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 55(4):552–561. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.664830>
  21. Cheng X, Zhang M, Adhikari B, Islam MdN (2014) Effect of power ultrasound and pulsed vacuum treatments on the dehydration kinetics, distribution, and status of water in osmotically dehydrated strawberry: a combined NMR and DSC study. *Food Bioproc Tech* 7(10):2782–2792. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1355-1>
  22. Chiralt A, Fito P (2003) Transport mechanisms in osmotic dehydration: the role of the structure. *Food Sci Tech Int* 9(3):179–186. <https://doi.org/10.1177/1082013203034757>
  23. Chitrakar B, Zhang M, Adhikari B (2019) Dehydrated foods: are they microbiologically safe? *Crit Rev Food Sci Nutr* 59(17):2734–2745. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1466265>
  24. Cichowska J, Figiel A, Stasiak-Różańska L, Witrowa-Rajchert D (2019) Modeling of osmotic dehydration of apples in sugar alcohols and dihydroxyacetone (DHA) solutions. *Foods* 8(1), 20. <https://doi.org/10.3390/foods8010020>
  25. Cichowska J, Kowalska H (2018) Effect of osmotic pre-treatment and temperature storage conditions on water activity and colour of dried apple. *Int J Food Eng* 14(2). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0158>
  26. Ciużyńska A, Kowalska H, Czajkowska K, Lenart A (2016) Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. *Trends Food Sci Technol* 50:186–192. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.017>
  27. Corrêa JLG, Pereira LM, Vieira GS, Hubinger MD (2010) Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *J Food Eng* 96(4):498–504. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.032>

28. Crank J (1975) *The mathematics of diffusion*. Clarendon Press, Oxford, pp 56–57
29. Dash KK, Balasubramaniam VM, Kamat S (2019) High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices. *J Food Eng* 247:19–29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.11.024>
30. de Jesus Junqueira JR, Corrêa JLG, de Mendonça KS, de Mello Júnior RE, de Souza AU (2018) Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: effect of vacuum pressure on the quality parameters. *Food Bioproc Tech* 11(10):1863–1875. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2147-9>
31. de Jesus Junqueira JR, Corrêa JLG, de Mendonça KS, Resende NS, de Barros Vilas Boas EV (2017) Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innov Food Sci Emerg Technol* 41:10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.01.006>
32. de Mello Jr RE, Corrêa JLG, Lopes FJ, de Souza AU, da Silva KCR (2019) Kinetics of the pulsed vacuum osmotic dehydration of green fig (*Ficus carica* L.). *Heat Mass Transf* 55(6):1685–1691. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02559-w>
33. Dellarosa N, Ragni L, Laghi L, Tylewicz U, Rocculi P, Dalla Rosa M (2016) Time domain nuclear magnetic resonance to monitor mass transfer mechanisms in apple tissue promoted by osmotic dehydration combined with pulsed electric fields. *Innov Food Sci Emerg Technol* 37:345–351. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.009>
34. Deng L-Z, Mujumdar AS, Zhang Q, Yang X-H, Wang J, Zheng Z-A, Gao Z-J, Xiao H-W (2019) Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 59(9):1408–1432. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1409192>
35. Dermesonlouoglou E, Chalkia A, Dimopoulos G, Taoukis P (2018) Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pre-treatments on mass transfer and quality of air-dried goji berry. *Innov Food Sci Emerg Technol* 49:106–115. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.08.003>
36. Dermesonlouoglou EK, Andreou V, Alexandrakis Z, Katsaros GJ, Giannakourou MC, Taoukis PS (2017) The hurdle effect of osmotic pretreatment and high-pressure cold pasteurization on the shelf-life extension of fresh-cut tomatoes. *Int J Food Sci Technol* 52(4):916–926. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13355>

37. Dermesonlouoglou EK, Angelikaki F, Giannakourou MC, Katsaros GJ, Taoukis PS (2019) Minimally processed fresh-cut peach and apricot snacks of extended shelf-life by combined osmotic and high pressure processing. *Food Bioproc Tech* 12(3):371–386. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2215-1>
38. Dermesonlouoglou EK, Bimpilas A, Andreou V, Katsaros GJ, Giannakourou MC, Taoukis PS (2017) Process optimization and kinetic modeling of quality of fresh-cut strawberry cubes pretreated by high pressure and osmosis: high pressure and osmotic treatment of strawberries for shelf life extension. *J Food Process Preserv* 41(5):1–14. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13137>
39. Dermesonlouoglou EK, Giannakourou MC (2019) Evaluation and modelling of osmotic pre-treatment of peach using alternative agents in a multiple-component solution: modelling osmotic pre-treatment of peach. *J Sci Food Agric* 99(3):1240–1249. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9296>
40. Dermesonlouoglou E, Zachariou I, Andreou V, Taoukis PS (2016) Effect of pulsed electric fields on mass transfer and quality of osmotically dehydrated kiwifruit. *Food Bioprod Process* 100:535–544. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.08.009>
41. Dias da Silva G, Barros ZMP, de Medeiros RAB, de Carvalho CBO, Rupert Brandão SC, Azoubel PM (2016) Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *LWT* 74:114–119. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.039>
42. El-Aouar ÂA, Azoubel PM, Barbosa JL, Xidieh Murr FE (2006) Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *J Food Eng* 75(2):267–274. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.016>
43. Feng Y, Yu X, Yagoub AEA, Xu B, Wu B, Zhang L, Zhou C (2019) Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration. *Ultrason Sonochem* 50:363–372. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.038>
44. Fernandes FAN, Rodrigues S (2017) Osmotic dehydration and blanching: ultrasonic pre-treatments. In M. Villamiel, A. Montilla, J. V. García-Pérez, J. A. Cárcel, & J. Benedito (Eds.), *Ultrasound Food Proc* (pp. 311–328). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118964156.ch11>

45. Ferrari CC, Arballo JR, Mascheroni RH, Hubinger MD (2011) Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum: osmotic dehydration of melon under vacuum. *Int J Food Sci Technol* 46(2):436–443. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02510.x>
46. Fito P (1994) Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. *J Food Eng* 22(1–4):313–328. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90037-X)
47. Flores-Andrade E, Pascual-Pineda LA, Alarcón-Elvira FG, Rascón Díaz MP, Pimentel-González DJ, Beristain CI (2017) Effect of vacuum on the impregnation of *Lactobacillus rhamnosus* microcapsules in apple slices using double emulsion. *J Food Eng* 202:18–24. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.005>
48. Garcia-Noguera J, Oliveira FIP, Weller CL, Rodrigues S, Fernandes FAN (2014) Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pretreatments on the colour of freeze dried strawberries. *J Food Sci Technol* 51(9):2222–2227. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0724-x>
49. George JM, Senthamizh Selvan T, Rastogi NK (2016) High-pressure assisted infusion of bioactive compounds in apple slices. *Innov Food Sci Emerg Technol* 33:100–107. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.11.010>
50. Gómez-Ramírez C, Sosa-Morales ME, Palou E, López-Malo A (2013) *Aspergillus niger* time to growth in dried tomatoes. *Int J Food Microbiol* 164(1):23–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.03.017>
51. González-Pérez JE, López-Méndez EM, Luna-Guevara JJ, Ruiz-Espinosa H, Ochoa-Velasco CE, Ruiz-López II (2019) Analysis of mass transfer and morphometric characteristics of white mushroom (*Agaricus bisporus*) pilei during osmotic dehydration. *J Food Eng* 240:120–132. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.026>
52. González-Pérez JE, López-Méndez EM, Ochoa-Velasco CE, Ruiz-López II (2019) Mass transfer and morphometric characteristics of fresh and osmodehydrated white mushroom pilei during convective drying. *J Food Eng* 262:181–188. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.06.017>

53. Kaymak-Ertekin F, Sultanoğlu M (2000) Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *J Food Eng* 46(4):243–250. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00084-4)
54. Kek SP, Chin NL, Yusof YA (2013) Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food Bioprod Process* 91(4):495–506. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.05.003>
55. Ketata M, Desjardins Y, Ratti C (2013) Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. *J Food Eng* 116(1):202–212. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.035>
56. Kiani H, Karimi F, Labbaf M, Fathi M (2018) A novel inverse numerical modeling method for the estimation of water and salt mass transfer coefficients during ultrasonic assisted-osmotic dehydration of cucumber cubes. *Ultrason Sonochem* 44:171–176. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.003>
57. Kowalska H, Marzec A, Kowalska J, Ciurzyńska A, Czajkowska K, Cichowska J, Rybak K, Lenart A (2017) Osmotic dehydration of Honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. *LWT Food Sci Technol* 85:500–505. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.044>
58. Kuo C-H, Lin J, Huang C-Y, Hsieh S-L, Li S, Kuo J-M, Shieh C-J (2018) Predicting sugar content of candied watermelon rind during osmotic dehydration. *Food Sci Technol* 38(suppl 1):228–235. <https://doi.org/10.1590/fst.18817>
59. Kusnadi C, Sastry SK (2012) Effect of moderate electric fields on salt diffusion into vegetable tissue. *J Food Eng* 110(3):329–336. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.004>
60. Lech K, Figiel A, Wojdyło A, Korzeniowska M, Serowik M, Szarycz M (2015) Drying kinetics and bioactivity of beetroot slices pretreated in concentrated chokeberry juice and dried with vacuum microwaves. *Dry Technol* 33(13):1644–1653. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1075209>
61. Lech K, Michalska A, Wojdyło A, Nowicka P, Figiel A (2017) The influence of the osmotic dehydration process on physico-chemical properties of osmotic solution. *Molecules* 22(12):2246. <https://doi.org/10.3390/molecules22122246>



62. 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* 91:588–594. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.012>
63. Li D, Zhu Z, Sun D-W (2018) Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: a review. *Trends Food Sci Technol* 75:46–55. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.019>
64. Liu B, Peng B (2017) Modelling and optimization of process parameters for strawberry osmotic dehydration using central composite rotatable design. *J Food Qual* 2017:1–7. <https://doi.org/10.1155/2017/2593213>
65. Luchese CL, Gurak PD, Marczak LDF (2015) Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT Food Sci Technol* 63(2):1128–1136. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.04.060>
66. Luo W, Tappi S, Wang C, Yu Y, Zhu S, Rocculi P (2018) Study of the effect of high hydrostatic pressure (HHP) on the osmotic dehydration mechanism and kinetics of wumei fruit (*Prunus mume*). *Food Bioproc Technol* 11(11):2044–2054. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2165-7>
67. Martín-Belloso O, Morales-de la Peña M (2018) Fruit preservation by ohmic heating and pulsed electric fields. In A. Rosenthal, R. Deliza, J. Welti-Chanes, & G. V. Barbosa-Cánovas (Eds.), *Fruit Preserv* (pp. 441–456). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_16)
68. Maurel C (1997) Aquaporins and water permeability of plant membranes. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 48:399–42969. Mavroudis, N. E., Dejmek, P., Sjöholm, I. (2004). Osmotic treatment-induced cell death and osmotic processing kinetics of apples with characterized raw material properties. *J Food Eng*, 63(1), 47–56. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00281-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00281-4)
70. Md Salim NS, Garièpy Y, Raghavan V (2016) Design of continuous flow osmotic dehydration and its performance on mass transfer exchange during osmotic dehydration of broccoli stalk slices. *Food Bioproc Technol* 9(9):1455–1470. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1732-z>

71. Miano AC, Rojas ML, Augusto PED (2017) Chapter 15—other mass transfer unit operations enhanced by ultrasound. In D. Bermudez-Aguirre (Ed.), *Ultrasound: Advances for Food Proc Preserv* (pp. 369–389). *Academic Press* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804581-7.00015-4>
72. Mokhtarian M, Heydari Majd M, Koushki F, Bakhshabadi H, Daraei Garmakhany A, Rashidzadeh S (2014) Optimization of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. *Qual Assur Saf Crop Foods* 6(2):201–214. <https://doi.org/10.3920/QAS2012.0121>
73. Monnerat SM, Pizzi TRM, Mauro MA, Menegalli FC (2010) Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: concentration profiles and effective diffusion coefficients. *J Food Eng* 100(4):604–612. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.008>
74. Mújica-Paz H, Valdez-Fragoso A, López-Malo A, Palou E, Welti-Chanes J (2003) Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *J Food Eng* 57(4):305–314. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00344-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00344-8)
75. Muñiz-Becerá S, Méndez-Lagunas LL, Rodríguez-Ramírez J (2017) Solute transfer in osmotic dehydration of vegetable foods: a review: solute transfer in osmotic dehydration. *J Food Sci* 82(10):2251–2259. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13857>
76. Muszyński S, Kornarzyński K, Gładyszewska B (2016) Osmotic dehydration of apples under reduced pressure conditions. *Agric Eng* 20(3):135–143. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2016-0051>
77. Nazari A, Salehi MA, Abbasi Souraki B (2019) Experimental investigation of effective factors of pulsed electric field in osmotic dehydration of apple. *Heat Mass Transf* 55(7):2049–2059. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02571-8>
78. Nowacka M, Tylewicz U, Laghi L, Dalla Rosa M, Witrowa Rajchert D (2014) Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chem* 144:18–25. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.129>

79. Nowacka M, Tylewicz U, Tappi S, Siroli L, Lanciotti R, Romani S, Witrowa-Rajchert D (2018) Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): study on quality parameters evolution during storage. *Food Control* 93:40–47. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.05.005>
80. Nowacka M, Wiktor A, Anuszevska A, Dadan M, Rybak K, Witrowa Rajchert D (2019) The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrason Sonochem* 56:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>
81. Nowacka Malgorzata, Laghi L, Rybak K, Dalla Rosa M, Witrowa-Rajchert D, Tylewicz U (2019) Water state and sugars in cranberry fruits subjected to combined treatments: cutting, blanching and sonication. *Food Chem* 299:125122. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125122>
82. Nowicka P, Wojdyło A, Lech K, Figiel A (2015) Influence of osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits. *Food Bioproc Technol* 8(4):824–836. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1447-y>
83. Nowicka P, Wojdyło A, Lech K, Figiel A (2015) Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried sour cherry fruits pre-dehydrated in fruit concentrates. *Food Bioproc Tech* 8(10):2076–2095. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1561-5>
84. Núñez-Mancilla Y, Pérez-Won M, Uribe E, Vega-Gálvez A, Di Scala K (2013) Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry (*Fragaria vesca*). *LWT. J Food Sci Technol* 52(2):151–156. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.027>
85. Núñez-Mancilla Y, Vega-Gálvez A, Pérez-Won M, Zura L, García-Segovia P, Di Scala K (2014) Effect of osmotic dehydration under high hydrostatic pressure on microstructure, functional properties and bioactive compounds of strawberry (*Fragaria vesca*). *Food Bioproc Tech* 7(2):516–524. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1052-5>

- 
86. Omolola AO, Jideani AIO, Kapila PF (2017) Quality properties of fruits as affected by drying operation. *Crit Rev Food Sci Nutr* 57(1):95–108. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.859563>
87. Onwude DI, Hashim N, Janius R, Abdan K, Chen G, Oladejo AO (2017) Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: a review of current technologies. *Innov Food Sci Emerg Technol* 43:223–238. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.010>
88. Osae R, Zhou C, Xu B, Tchabo W, Tahir HE, Mustapha AT, Ma H (2019) Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices. *J Food Biochem* 43(5):1–14. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12832>
89. Pacheco-Angulo H, Herman-Lara E, García-Alvarado MA, RuizLópez II (2016) Mass transfer modelling in osmotic dehydration: equilibrium characteristics and process dynamics under variable solution concentration and convective boundary. *Food Bioprod Process* 97:88–99. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.11.002>
90. Parniakov O, Bals O, Lebovka N, Vorobiev E (2016) Effects of pulsed electric fields assisted osmotic dehydration on freezing thawing and texture of apple tissue. *J Food Eng* 183:32–38. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.013>
91. Pei F, Xiao K, Chen L, Yang W, Zhao L, Fang Y, Ma N, Mariga AM, Hu Q (2019) Mass transfer characteristics during ultrasound assisted osmotic dehydration of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *J Food Sci Technol* 56(4):2213–2223. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03707-8>
92. Peleg M (1988) An empirical model for the description of moisture sorption curves. *J Food Sci* 53(4):1216–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>
93. Phisut N (2012) Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *Int Food Res J* 19:7–18
94. Porciuncula BDA, Zotarelli MF, Carciof BAM, Laurindo JB (2013) Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (*Prata variety*) during osmotic dehydration and its use in predictive models. *J Food Eng* 119(3):490–496. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.011>

95. Prithani R, Dash KK (2020) Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. *Innov Food Sci Emerg Technol* 64:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102407>
96. Qiu L, Zhang M, Tang J, Adhikari B, Cao P (2019) Innovative technologies for producing and preserving intermediate moisture foods: a review. *Food Res Int* 116:90–102. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.055>
97. Rahaman A, Zeng XA, Kumari A, Rafiq M, Siddeeg A, Manzoor MF, Baloch Z, Ahmed Z (2019) Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum. *Ultrason Sonochem* 58:104643. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104643>
98. Rahman SMA, Hoque ME, Rahman S, Hasanuzzaman M (2015) Osmotic dehydration of pumpkin using response surface methodology -influences of operating conditions on water loss and solute gain. *J Bioprocess Biotech* 05(05). <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000226>
99. Ramya V, Jain NK (2017) A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: an integrated approach: osmo-dehydration of fruits and vegetables. *J Food Proc Eng* 40(3):124–140. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12440>
100. Rongtong B, Suwonsichon T, Ritthiruangdej P, Kasemsumran S (2018) Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. *Agric Nat Resour* 52(6):557–564. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.11.023>
101. Ruiz-López II, Huerta-Mora IR, Vivar-Vera MA, Martínez-Sánchez CE, Herman-Lara E (2010) Effect of osmotic dehydration on air drying characteristics of chayote. *Dry Technol* 28(10):1201–1212. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.482716>
102. Sabarez H T (2018) Thermal drying of foods. In A. Rosenthal, R. Deliza, J. Welti-Chanes, & G. V. Barbosa-Cánovas (Eds.), *Fruit Preserv* (pp. 181–210). Springer New York [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7)
103. Şahin U, Öztürk HK (2016) Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L.). *Innov Food Sci Emerg Technol* 36:104–111. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.003>

104. Şahin U, Öztürk HK (2018) Comparison between artificial neural network model and mathematical models for drying kinetics of osmotically dehydrated and fresh figs under open sun drying. *J Food Proc Eng* 41(5):e12804. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12804>
105. Samborska K, Eliasson L, Marzec A, Kowalska J, Piotrowski D, Lenart A, Kowalska H (2019) The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extract to sugar solution on osmotic dehydration and sensory properties of apples. *J Food Sci Technol* 56(4):1927–1938. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03658-0>
106. Sangeeta, Hathan, BS (2016) Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam (*Amorphophallus* spp.) during osmotic dehydration in sodium chloride solution: Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam. *J Food Proc Preserv* 40(3):521–530. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12631>
107. Santillana Farakos SM, Frank JF, Schafner DW (2013) Modeling the influence of temperature, water activity and water mobility on the persistence of Salmonella in low-moisture foods. *Int J Food Microbiol* 166(2):280–293. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.07.007>
108. Seguí L, Fito PJ, Albors A, Fito P (2006) Mass transfer phenomena during the osmotic dehydration of apple isolated protoplasts (*Malus domestica* var. Fuji). *J Food Eng* 77(1):179–187. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.058>
109. Sethi K, Kaur M (2019) Effect of osmotic dehydration on physicochemical properties of pineapple using honey, sucrose and honey-sucrose solutions. *Int J Eng Adv Technol* 9(1):6257–6262. <https://doi.org/10.35940/ijeat.A2026.109119>
110. Shamaei S, Emam-Djomeh Z, Moini S (2012) Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties: ultrasound osmotic dehydration of cranberry. *J Texture Stud* 43(2):133–141. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x>
111. Shete YV, Chavan SM, Champawat PS, Jain SK (2018) Reviews on osmotic dehydration of fruits and vegetables. *J Pharmacogn Phytochem* 7(2):1964–1969
112. Simpson R, Ramírez C, Birchmeier V, Almonacid A, Moreno J, Nuñez H, Jaques A (2015) Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of *Granny Smith*

- apples subjected to a moderate electric field. *J Food Eng* 166:204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027>
113. Sucheta Chaturvedi K, Yadav SK (2019) Ultrasonication assisted salt-spices impregnation in black carrots to attain anthocyanins stability, quality retention and antimicrobial efficacy on hot-air convective drying. *Ultrason Sonochem* 58:104661. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104661>
114. 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* 98:179–186. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.032>
115. Tiroutchelvame D, Sivakumar V, Maran P (2015) Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of amla (*Emblica officinalis* L.) cubes in sugar solution. *Chem Ind Chem Eng Q* 21(4):547–559. <https://doi.org/10.2298/CICEQ140712011T>
116. Toupin CJ, Marcotte M, Le Maguer M (1989) Osmotically-induced mass transfer in plant storage tissues: a mathematical model Part I. *J Food Eng* 10(1):13–38. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(89\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0260-8774(89)90018-6)
117. Trafano-Schifo Maria Victoria, Laghi L, Castro-Giraldez M, Tylewicz U, Rocculi P, Ragni L, Dalla Rosa M, Fito PJ (2017) Osmotic dehydration of organic kiwifruit pre-treated by pulsed electric fields and monitored by NMR. *Food Chem* 236:87–93. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.046>
118. Trafano-Schifo MV, Tylewicz U, Castro-Giraldez M, Fito PJ, Ragni L, Dalla Rosa M (2016) Effect of pulsed electric fields pre-treatment on mass transport during the osmotic dehydration of organic kiwifruit. *Innov Food Sci Emerg Technol* 38:243–251. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.011>
119. Tylewicz U, Tappi S, Mannozi C, Romani S, Dellarosa N, Laghi L, Ragni L, Rocculi P, Dalla Rosa M (2017) Effect of pulsed electric field (PEF) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *J Food Eng* 213:2–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.028>
120. Verma D, Kaushik N, Rao PS (2014) Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of banana slices (*Musa cavendishii*) finish-dried by dehumidified air drying. *Food Bioproc Tech* 7(5):1281–1297. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1124-6>

121. Vilela A, Sobreira C, Abraão AS, Lemos AM, Nunes FM (2016) Texture quality of candied fruits as influenced by osmotic dehydration agents. *J Texture Stud* 47(3):239–252. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12177>
122. Wang J, Law CL, Nema PK, Zhao JH, Liu ZL, Deng LZ, Gao ZJ, Xiao HW (2018) Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *J Food Eng* 224:129–138. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.002>
123. Witrowa-Rajchert D, Wiktor A, Sledz M, Nowacka M (2014) Selected emerging technologies to enhance the drying process: a review. *Dry Technol* 32(11):1386–1396. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.903412>
124. Wu X, Wang C, Guo Y (2020) Effects of the high-pulsed electric field pretreatment on the mechanical properties of fruits and vegetables. *J Food Eng* 274:109837. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109837>
125. Yadav AK, Singh SV (2014) Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *J Food Sci Technol* 51(9):1654–1673. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0659-2>
126. Yao Z, Le Maguer M (1996) Mathematical modelling and simulation of mass transfer in osmotic dehydration processes. Part I: Conceptual and mathematical models. *J Food Eng* 29(3–4):349–360. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00045-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00045-3)
127. Yildiz H, Icier F, Eroglu S, Dagci G (2016) Effects of electrical pretreatment conditions on osmotic dehydration of apple slices: experimental investigation and simulation. *Innov Food Sci Emerg Technol* 35:149–159. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.001>
128. Yordanov DG, Angelova GV (2010) High pressure processing for foods preserving. *Biotechnol Biotechnol Equip* 24(3):1940–1945. <https://doi.org/10.2478/V10133-010-0057-8>
129. Yu Y, Jin TZ, Fan X, Wu J (2018) Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments. *Food Chem* 239:1219–1225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.071>
130. Yu Y, Jin TZ, Fan X, Xu Y (2017) Osmotic dehydration of blueberries pretreated with pulsed electric fields: effects on dehydration kinetics, and microbiological and



- nutritional qualities. *Dry Technol* 35(13):1543–1551.  
<https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1260583>
131. Zecchi B, Gerla P (2020) Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. *J Food Eng* 274:1–8.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109821>
- .

## CAPÍTULO 2

### **Modelación de la transferencia de masa durante la osmodeshidratación de cubos de manzana con soluciones de sacarosa o jugo concentrado de manzana: Estimación del equilibrio, modelo de difusión y enfoque basado en el observador de estado**

Julio E. González-Pérez; Aarón Romo-Hernández; Nelly Ramírez-Corona; Aurelio López-Malo.

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

#### *Resumen*

Este artículo investiga los aspectos de modelación de la transferencia de masa durante la osmodeshidratación de cubos de manzana. Los datos experimentales obtenidos se ajustaron a tres modelos matemáticos: El modelo de transferencia de masa en equilibrio de Azuara (AM), la segunda ley de Fick (FSL) y un observador de Luenberger (LO). Dos escenarios fueron considerados para la modelación de la transferencia de masa entre la solución osmótica y los cubos de manzana. En el primero se consideró que durante el proceso de deshidratación osmótica el volumen de la manzana se mantuvo constante. Posteriormente, se incluyó el encogimiento del producto deshidratado como parte del modelo. Además, el efecto del agente osmótico en la deshidratación de la manzana se abordó considerando dos diferentes soluciones osmóticas, jugo concentrado de manzana y soluciones de sacarosa, con diferentes concentraciones (40, 50 y 60 °Brix). Los parámetros de equilibrio estimados con el modelo AM fueron similares a los parámetros determinados experimentalmente ( $p > 0.05$ ). El modelo LO describe con precisión la dinámica de transferencia de masa de soluto durante el proceso de osmodeshidratación ( $R^2 > 0.950$ ). Los resultados generales indican que la consideración de la contracción de volumen como parte del modelo influye fuertemente en la estimación de los parámetros. Al considerar la contracción de volumen en el modelo FSL, los parámetros de difusividad estimados oscilaron entre 1.26 y  $5.05 \times 10^{-10}$

$\text{m}^2 / \text{s}$  para el agua y de  $0.68 - 19.35 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$  para los solutos, respectivamente. Si no se considera la contracción del producto en el modelo de difusividad lleva a sobrestimar tanto la difusividad del agua (29.9 - 76.8 %) como la difusividad del soluto (25.3 - 52.8 %).

### *Aplicaciones prácticas*

La deshidratación osmótica (DO) se refiere a un proceso de transferencia de masa en el que los solutos son transportados desde una solución hipertónica a la matriz alimenticia, mientras que el agua se mueve desde la matriz alimenticia hacia la solución. La DO mejora el aspecto y el sabor de los alimentos deshidratados, ayuda a inhibir el crecimiento de microorganismos peligrosos y disminuye el pardeamiento enzimático en algunos alimentos. Las soluciones de sacarosa se utilizan con frecuencia como soluciones osmóticas para el tratamiento de alimentos en DO. Una alternativa a la sacarosa es tratar los alimentos con jugo concentrados de frutas. Los jugos concentrados de frutas tienen una baja actividad de agua y pueden aportar compuestos bioactivos que enriquecen el producto deshidratado. Por lo tanto, comprender el efecto de los distintos factores en la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica es fundamental para el diseño, la optimización, la ampliación y el funcionamiento eficiente de los procesos de tratamiento de alimentos en DO. Además, la selección adecuada de las condiciones de deshidratación osmótica permite obtener productos alimentarios de alta calidad con una composición, propiedades texturales/sensoriales y características microbiológicas específicas. Por lo tanto, la deshidratación osmótica es una alternativa de procesamiento de alimentos que nos permite obtener productos alimenticios de alta calidad con buenos atributos nutricionales.

**Palabras clave:** Modelo de Azuara, segunda ley de Fick, contracción de alimentos, observador de Luenberger, deshidratación osmótica.

## **2.1 Introducción**

La deshidratación osmótica de frutas y hortalizas se produce por la inmersión de la matriz alimenticia dentro de una solución hipertónica, en la que los solutos se mueven desde la

solución hacia la matriz alimenticia, y el agua se mueve hacia la solución (González-Pérez *et al.*, 2021; Khoualdia *et al.*, 2020). La solución osmótica desempeña un papel esencial durante la osmodeshidratación: reduce la actividad del agua, ayuda a inhibir el crecimiento microbiano, reduce el pardeamiento enzimático y, por tanto, mejora las características del producto alimentario. Como resultado, los alimentos osmodeshidratados pueden tener una mejor apariencia y sabor que los alimentos tratados con otros métodos de conservación (Cichowska *et al.*, 2018; Maldonado y González Pacheco, 2022). Para la deshidratación de fruta se utiliza frecuentemente sacarosa como solución osmótica. Sin embargo, puede producir alimentos con una elevada concentración de compuestos altamente calóricos. Una alternativa más saludable para la deshidratación de la fruta es sustituir la sacarosa por otras soluciones osmóticas como los jugos concentrados de frutas (González-Pérez y López-Malo, 2022). Los jugos concentrados de frutas y hortalizas tienen bajos valores de actividad de agua y pueden ser utilizados como soluciones osmóticas para la deshidratación de alimentos. Además, el uso de jugos de frutas y hortalizas para el tratamiento de alimentos proporciona una fuente de compuestos bioactivos para obtener productos de alta calidad con un alto valor nutricional (González-Pérez *et al.*, 2022; Peng *et al.*, 2019). Los jugos concentrados han sido explorados en la literatura como medios osmóticos para la deshidratación de alimentos (Cichowska *et al.*, 2018; González-Pérez y López-Malo, 2022; Guerra-Valle *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2019). Por ejemplo, el azúcar natural del jugo concentrado de manzana se ha utilizado para aumentar el dulzor de zanahoria osmodeshidratada, cereza ácida, arándanos, grosellas negras y manzanas (González-Pérez *et al.*, 2021; Peng *et al.*, 2019).

Además de seleccionar la solución hipertónica adecuada, definir las condiciones óptimas de funcionamiento durante los procesos de deshidratación osmótica es fundamental para producir alimentos de alta calidad con características específicas (Georgiadis *et al.*, 2020). Para determinar dichas condiciones óptimas, se necesitan modelos fiables que describan la cinética de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica. La segunda ley de Fick se utiliza con frecuencia para modelar los mecanismos de transferencia de masa durante el procesamiento de alimentos, en los que los parámetros de transferencia de masa pueden obtenerse experimentalmente o utilizando modelos teóricos/empíricos como los presentados por Azuara o Peleg (González-Pérez *et al.*, 2021). La literatura

científica enfatiza la importancia de entender el efecto de diferentes factores sobre los parámetros que afectan a la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica (Dermesonlouoglou y Giannakourou, 2018). Además, podemos encontrar reportado en la literatura cómo la estimación de la difusividad se mejora cuando el modelo considera el tamaño del producto y la forma real durante el proceso (Pinheiro *et al.*, 2021; Zecchi y Gerla, 2020).

Una alternativa para modelar la deshidratación osmótica es implementar modelos basados en la teoría de control para describir procesos dependientes del tiempo. Los modelos dinámicos de entrada/salida de primer orden, se han usado para estimar los parámetros cinéticos y las curvas del proceso de transferencia de masa en procesos como la deshidratación osmótica y la extracción sólido-líquido de materiales alimentarios (Katsoufi *et al.*, 2017; Martínez-Vera *et al.*, 2010; Martínez-Vera *et al.*, 2013). Los observadores de estado, una clase particular de modelos basados en la teoría de control, describen el comportamiento dinámico de las variables y parámetros que no pueden medirse directamente. Dependiendo del modelo de proceso que se utilice, los observadores deterministas (como un observador de Luenberger) o estocásticos (como los filtros de Kalman) podrían representar una mejor opción para describir el proceso (Jiang y Liu, 2022; Ortega *et al.*, 2019). En particular, el observador de Luenberger ha sido implementado como herramienta para recuperar coeficientes de difusión dependientes de la concentración en procesos de secado (Martínez-Vera *et al.*, 2009, 2013).

En este estudio se evalúa la eficacia de dos soluciones hipertónicas (sacarosa o jugo de manzana concentrado) en los procesos de deshidratación osmótica de los cubos de manzana. Se consideran tres enfoques matemáticos diferentes para modelar la cinética de transferencia de masa: El modelo de transferencia de masa en equilibrio de Azuara, la segunda ley de Fick y un observador de Luenberger. El observador de estado se implementó para describir la concentración de solutos dentro de los cubos de manzana, mientras que simultáneamente se estimó la trayectoria dinámica de la difusividad del soluto. Las estimaciones del observador se compararon con las obtenidas por la segunda ley de Fick y las aproximaciones de equilibrio de Azuara.

## 2.2 Materiales y métodos

### 2.2.1 Materiales

Se compraron manzanas frescas (*Malus domestica* L.) de la var. *Granny Smith* en un supermercado local (San Andrés Cholula, Puebla, México) y se procesaron el mismo día. Las manzanas se lavaron, se higienizaron con una solución de hipoclorito de sodio (100 mg / L) durante 5 min y se pelaron. A continuación, las manzanas se cortaron en cubos (1.2 × 1.2 × 1.2 cm) con un cortador de verduras industrial, una cuchilla y unas tijeras de corte (integradas con una tabla de cortar). Para la preparación de las soluciones osmóticas se utilizó jugo de manzana comercial concentrado (70 °Brix *M. domestica* L., *Ingredion México S.A. de C.V.*) y sacarosa refinada granulada (grado alimenticio). Las soluciones osmóticas se prepararon disolviendo el jugo o la sacarosa granulada en agua destilada para obtener soluciones con concentraciones de 40, 50 y 60 °Brix.

### 2.2.2 Experimentos de osmodeshidratación

Las condiciones experimentales de los procedimientos osmóticos se establecieron según un diseño factorial 2 × 3. Las condiciones experimentales incluían las combinaciones resultantes del tipo de solución osmótica (concentrado de manzana o solución de sacarosa) y los niveles de concentración de la solución osmótica (40, 50 o 60 °Brix). Se consideró una proporción de 10 g de solución osmótica / g de producto para evitar una dilución significativa del jarabe (Ayala-Aponte *et al.*, 2018). Cada uno de los experimentos se realizó por triplicado. Los cubos de manzana se osmodeshidrataron en tubos de vidrio (20 × 150 mm), que se mantuvieron sumergidos en la solución osmótica utilizando un tubo de vidrio de 0.5 × 100 mm, para evitar que la muestra flotara y asegurar el contacto entre el producto y la solución osmótica (Ayala-Aponte *et al.*, 2018). Antes de cada experimento, el sistema osmótico se precalentó a 40 °C en un baño de agua (StableTemp 12501-10, Oakton Instruments, Vernon Hills, IL). La muestra completa (fruta y solución) se extrajo para su análisis en diferentes momentos (un tubo para cada tiempo). Para todos los experimentos, el tiempo máximo de deshidratación fue de 5760 min, tiempo suficiente para garantizar el estado de equilibrio de transferencia de masa (González-Pérez *et al.*, 2021; Luo *et al.*,

2019). Una vez finalizado el proceso de osmodeshidratación, los cubos fueron retirados de la solución osmótica, enjuagados con agua destilada y se secaron suavemente con una toalla de papel para eliminar cualquier adherencia de la solución osmótica (González-Pérez *et al.*, 2019).

Las dimensiones de los cubos osmodeshidratados se determinaron por el método de medición directa (Li *et al.*, 2020). La longitud (de tres lados del cubo) desde el vértice hasta la línea central paralela correspondiente se midió con un vernier digital (Truper, modelo CALDI-MP, México). Se cortó transversalmente de 0.5 - 1.0 mm de grosor del centro del cubo con una cuchilla de afeitar. Se tomaron imágenes digitales de los cortes resultantes. Posteriormente, estas se utilizaron para evaluar el encogimiento y la deformación del producto durante el proceso. La actividad de agua de los cubos ( $a_{w,producto}$ ) se determinó utilizando un higrómetro de punto de rocío (AquaLab, 4TEV, EE. UU.). Los cubos de manzana se prepararon para la cuantificación de °Brix: cubos osmodeshidratados y agua desionizada, en proporción másica de 1:4, se homogeneizaron durante 3 min a 8000 rpm utilizando el homogeneizador Ultraturrax IKA (IKA, Staufen, Alemania). Los sólidos solubles totales de la muestra diluida (TSS, en °Brix) se midieron con un refractómetro digital (Atago Co., Pocket PAL-RI, Tokio, Japón). TSS se calcularon utilizando el factor de dilución según  $TSS_{muestra} = TSS_{muestra\ diluida} \times \text{volumen de agua en mL} / \text{peso de la muestra en g}$  (Rongtong *et al.*, 2018). Además, el contenido de humedad ( $\eta_t$ ) se determinó mediante la Ecuación (1). En la Ecuación (1), el parámetro  $w_{t,d}$  se determinó mediante el secado en estufa (105 °C) hasta un peso constante. La  $a_w$  de la solución osmótica ( $a_{w,solución\ osmótica}$ ) se determinó a cada tiempo de inmersión para conocer el estado de equilibrio de transferencia de masa ( $a_{w,producto} = a_{w,solución\ osmótica}$ ) (Ayala-Aponte *et al.*, 2018).

La transferencia de masa durante los experimentos de deshidratación osmótica se determinó considerando despreciable la lixiviación de sólidos del producto durante el procesamiento. La pérdida de agua ( $WL$ ) y la ganancia de solutos ( $SG$ ) se calcularon con las Ecuaciones (2) y (3) (González-Pérez *et al.*, 2019):

$$\eta_t = \frac{w_t - w_{t,d}}{w_t}, \quad t \geq 0 \quad (1)$$

$$WL = \frac{w_0\eta_0 - w_t\eta_t}{w_0} \quad (2)$$

$$SG = \frac{w_t(1-\eta_t) - w_0(1-\eta_0)}{w_0} \quad (3)$$

donde  $w_0$  y  $w_t$  son el peso de los cubos frescos y tratados en g, respectivamente;  $w_{t,d}$  es el peso de los cubos tratados secados en g.  $\eta_0$  es el contenido de humedad inicial y  $\eta_t$  es el contenido de humedad a un determinado tiempo de inmersión.  $WL$  es la pérdida de agua (g de agua / g de producto), y  $SG$  es la ganancia de solutos (g solutos / g producto).

Los parámetros de color de las manzanas frescas y osmodeshidratadas en equilibrio se midieron con un colorímetro (Konica Minolta CR-400, Osaka, Japón) utilizando un iluminante C y un ángulo de observación 2°. Los parámetros de color se expresaron en el espacio de color CIELab\* y se utilizaron para calcular la diferencia neta de color ( $\Delta E = ((L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2)^{1/2}$ ;  $L_0^*$ ,  $a_0^*$ , y  $b_0^*$  son los parámetros de color de la manzana fresca,  $Chrome = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ , y  $^{\circ}Hue = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ ).

### 2.2.3 Análisis del encogimiento-deformación

El análisis de la deformación por encogimiento de los cubos de manzana se realizó mediante el procesamiento de imágenes. Se tomaron imágenes digitales de los cortes de las muestras y se procesaron según lo descrito por González-Pérez *et al.* (2019) para obtener el área seccional media y el perímetro medio de las muestras. La información de color de las imágenes digitales se transformó en el espacio de color CIELab, lo que permitió eliminar el fondo. La imagen sin fondo se convirtió a formato de escala de grises y se extrajeron las coordenadas de los límites del producto (600 puntos). Se calcularon las características relevantes del perímetro obtenido con el perímetro medio de seis muestras siguiendo la metodología de González-Pérez *et al.* (2019). El análisis del encogimiento de los cubos durante la deshidratación osmótica se realizó estudiando la longitud característica adimensional (longitud de la muestra a un determinado tiempo de inmersión / longitud característica del cubo fresco,  $L(t)/L_0$ ) en función del tiempo de inmersión (Li *et al.*, 2020). La longitud característica adimensional se estimó con el área de la sección



transversal de cada muestra y se modeló mediante la Ecuación (4). El análisis de la imagen se realizó utilizando Matlab Image Processing Toolbox 7.0 (Matlab R2020b, MathWorks Inc., Natick, MA, EE. UU.).

$$\frac{L(t)}{L_0} = \frac{(A(t))^{1/2}}{A_0^{1/2}} = 1 - \frac{v_{m,n} \iota_{m,n} t}{1+v_{m,n} t}, L(t) = L_0 \left[ 1 - \frac{v_{m,n} \iota_{m,n} t}{1+v_{m,n} t} \right] \quad (4)$$

Donde  $L(t)$  y  $L_0$  son el semi-espesor del cubo de manzana (m) en el momento  $t$  y en el momento inicial, respectivamente;  $A(t)$  y  $A_0$  son el área de la sección transversal del cubo de manzana (m) en el momento  $t$  y en el momento inicial, respectivamente;  $v$  y  $\iota$  son parámetros ajustables correspondientes a cada condición experimental ( $m$ , tipo de solución osmótica, y  $n$ , concentración de la solución osmótica), el parámetro  $v$  es la reducción de la longitud característica adimensional en el estado de equilibrio, el parámetro  $\iota$  es la constante relacionada con la tasa de contracción, y  $t$ , el tiempo de inmersión (s).

## 2.2.4 Modelación de la transferencia de masa durante la osmodeshidratación

### 2.2.4.1 Modelo de equilibrio de transferencia de masa

Los parámetros de equilibrio de transferencia de masa relacionados con la pérdida de agua y la ganancia de solutos ( $\Delta_{j,e}$ ) se determinaron utilizando el modelo de Azuara, como se describe en la Ecuación (5) (Prithani y Dash, 2020).

$$\Delta_j = \frac{\beta_j \Delta_{j,e} t}{1 + \beta_j t}$$

$$j = A, \beta_A, \Delta_A = WL \text{ y } \Delta_{A,e} = WL_e \quad \text{o} \quad j = S, \beta_S, \Delta_S = SG \text{ y } \Delta_{S,e} = SG_e \quad (5)$$

donde  $\Delta_j$  son los parámetros de transferencia de masa para la pérdida de agua ( $WL$ ) y la ganancia de solutos ( $SG$ ) en g / g;  $\Delta_{j,e}$  es el parámetro de equilibrio para  $WL$  ( $WL_e$ ) y  $SG$

( $SG_e$ ) en g / g;  $\beta_j$  son las constantes relacionadas con la tasa de  $WL$  ( $\beta_A$ ) y  $SG$  ( $\beta_S$ ) en 1 / s;  $t$  es el tiempo de inmersión en s.

La Ecuación (5) se linealizó como Ecuación (6). La pérdida de agua de equilibrio ( $WLe$ ) o la ganancia de solutos en equilibrio ( $SG_e$ ), y las constantes relacionadas con la tasa de a la tasa de  $WL$  ( $\beta_A$ ) y  $SG$  ( $\beta_S$ ), se obtuvieron a partir de las pendientes recíprocas de  $t / WL$  o  $t / SG$  vs. tiempo de inmersión ( $t$ ), respectivamente (Hamedi *et al.*, 2018).

$$\frac{t}{\Delta_j} = \frac{1}{\Delta_{j,e}} t + \frac{1}{\beta_j \Delta_{j,e}}; \quad j = A, \frac{t}{WL} = \frac{1}{WLe} t + \frac{1}{\beta_A WLe}; \quad j = S, \frac{t}{SG} = \frac{1}{SG_e} t + \frac{1}{\beta_S SG_e} \quad (6)$$

#### 2.2.4.2 Modelación de transferencia de masa con la segunda ley de Fick considerando volumen constante

La pérdida de agua y de ganancia de solutos de cubos de manzana durante la deshidratación osmótica se describió utilizando la segunda ley de difusión de Fick (Ecuación (7)). La difusión descrita en la Ecuación (7) se modeló utilizando los siguientes supuestos: (i) distribución uniforme del contenido de agua y solutos al inicio del proceso (un material homogéneo e isotrópico); (ii) la forma del producto se aproximó mediante una geometría cúbica; (iii) el agua y los solutos son las únicas sustancias difusoras ( $j = A, S$ , respectivamente); (iv) los coeficientes de difusión son constantes; (v) la superficie externa del producto está en completo contacto con la solución osmótica; (vi) la resistencia externa a la transferencia de masa en la superficie del producto es insignificante superficie del producto; (vii) cubos de volumen constante; (viii) el proceso ocurre a una temperatura constante; y (ix) la concentración del medio osmótico es constante durante el proceso (González-Pérez *et al.*, 2019). Considerando los supuestos anteriores, el modelo de transferencia de masa se describe en términos de concentración adimensional ( $\Psi_j$ ) como:

$$\Psi_j = \left[ \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{[2i+1]^2} \exp \left[ -\frac{[2i+1]^2 \pi^2}{4} \tau_j \right] \right]^3 \quad (7)$$

Las variables dimensionales en la Ecuación (7) se definen como (González-Pérez *et al.*, 2019):

$$\tau_j = \frac{D_j}{[L_0]^2} t \quad (8)$$

$$\Psi_j = 1 - \frac{\Delta_j}{\Delta_{j,e}}; \quad j = A, \Psi_A = 1 - \frac{WL}{WL_e} \quad \text{o} \quad j = S, \Psi_S = 1 - \frac{SG}{SG_e} \quad (9)$$

donde  $\tau_j$  es el número de Fourier para el agua ( $\tau_A$ ) y los solutos ( $\tau_S$ ) es adimensional;  $D_j$  es el coeficiente efectivo de difusividad del agua ( $D_A$ ) y solutos ( $D_S$ ) en  $m^2 / s$ ;  $L_0$  es la mitad del espesor del cubo en m;  $\Psi_A$  y  $\Psi_S$  son las concentraciones adimensionales de agua y solutos, respectivamente;  $WL$  y  $SG$  son los parámetros de transferencia de masa (g / g) obtenidos experimentalmente; y  $WL_e$  y  $SG_e$  son los parámetros de transferencia de masa (g / g) en condiciones de equilibrio, estimados con el modelo de Azuara descrito en la Ecuación (6).

Considerando las hipótesis (i) y (ii), las condiciones iniciales del proceso son las siguientes:

$$\Psi_j = 1 \text{ for } 0 \leq \xi \leq \frac{x}{L_x}, \tau_j = 0 \quad (10)$$

$$\Psi_j = 0 \text{ for } \xi = 0, \frac{x}{L_x}, \tau_j > 0 \quad (11)$$

donde  $\xi$  es la longitud adimensional. Se ha considerado el mismo valor de espesor considerado para las tres coordenadas del cubo ( $L(t) = x = y = z$ , y  $L_x = L_y = L_z$ ).  $L(t)$  es la mitad del espesor de la muestra en el tiempo de inmersión determinado. Según la hipótesis (vii), la mitad del espesor de la muestra era  $L_x = L_0 = 0.00609 \pm 0.0001$  m durante todos los procesos.

### 2.2.4.3 Modelación de transferencia de masa con la segunda ley de Fick considerando volumen variable

Como se ha comentado anteriormente, la estimación de la difusividad mejora cuando el modelo contempla el tamaño del producto y la forma real durante el proceso. Se utilizó el método de la pendiente modificada de la Ecuación (12) para calcular la difusividad del agua y los solutos teniendo en cuenta el encogimiento del producto osmodeshidratado. Brevemente, el número de Fourier de Ecuación (7) se sustituyó por una definición más general ( $\theta_j$ ), descrita en la Ecuación (12) (Ruiz-López *et al.*, 2012).

$$\theta_j = \int_0^t \frac{D_j(t)}{(L(t))^2} dt = \int_0^t \frac{D_j(\Psi_j)}{(L(\Psi_j))^2} dt \quad (12)$$

Donde  $D_j(t)$  y  $L(t)$  son el coeficiente efectivo de difusividad del agua ( $D_A(t)$ ) o de los solutos ( $D_S(t)$ ) en función del tiempo ( $t$ ), y la mitad del espesor de la muestra en un determinado tiempo de inmersión, respectivamente.  $D_j(\Psi_j)$  y  $L(\Psi_j)$  son el coeficiente efectivo de difusividad del agua ( $D_A(\Psi_A)$ ) o de los solutos ( $D_S(\Psi_S)$ ) en función de las concentraciones adimensionales del agua y de los solutos y de la mitad del espesor de la muestra a una determinada relación de difusión del agua y de los solutos, respectivamente.

Los valores medios de las difusividades del agua y de los solutos para cada tratamiento, con o sin contracción, se determinaron mediante la integración numérica de los valores locales evaluando la siguiente expresión con la regla trapezoidal.

$$D_j(\Psi_j) = \frac{\int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 D_j d\Psi_j}{\int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 d\Psi_j} \quad (13)$$

### 2.2.4.4 Modelación de la transferencia de solutos con un observador de Luenberger

La dinámica de transferencia de solutos en la deshidratación osmótica de cubos de manzana se estimó utilizando un observador de Luenberger. Se eligió un modelo dinámico de primer

orden para describir la concentración de solutos en el interior de los cubos de manzana ( $C_s$ ) en función del tiempo:

$$\frac{dC_s}{dt} = k(C_s^\infty - C_s), \quad (14)$$

donde  $C_s^\infty$  y  $C_s$  representan la concentración de azúcar (°Brix) fuera y dentro de los cubos de manzana, respectivamente,  $t$  representa el tiempo (s), y  $k$  representa un parámetro de transporte de masa desconocido (1 / s). El modelo dinámico (14) se desarrolló bajo las siguientes consideraciones: (i) la solución osmótica no se diluye en el tiempo debido al proceso de deshidratación; así, la concentración del medio osmótico ( $C_s^\infty$ ) se consideró constante, (ii) los cubos de manzana son lo suficientemente pequeños como para considerar la concentración de agua y solutos en los cubos de manzana espacialmente homogénea, (iii) la transferencia de masa de los componentes químicos entre la solución osmótica y los cubos de manzana se produce sólo por difusión, y (iv) los procesos de transferencia de masa ocurren a una temperatura constante.

Considerando el modelo (14) como punto de partida, es posible establecer un observador de Luenberger (Ortega *et al.*, 2019) para estimar el parámetro de transporte  $k$  en nuestro modelo matemático. Las medidas de concentración de azúcar, tomadas de un refractómetro digital, fueron consideradas como señales de entrada para el observador. Dejemos que  $C_s^\infty$  y  $C_s$  representen los valores medidos para la concentración de soluto en el medio osmótico y en el interior de los cubos de manzana, respectivamente. Una estimación  $\hat{k}$  para el parámetro de transporte de masa  $k$  se recuperó como la solución del siguiente observador de Luenberger:

$$\frac{d\hat{C}_s}{dt} = \hat{k}(C_s^\infty - C_s) - \omega(C_s - \hat{C}_s) \quad (15)$$

$$\frac{d\hat{k}}{dt} = \gamma C_s(C_s - \hat{C}_s), \quad (16)$$

donde  $\hat{C}_s$  representa la concentración estimada de azúcar dentro del producto (°Brix), y los parámetros  $\omega$  y  $\gamma$  representan parámetros de sintonía que determinan la tasa de

convergencia del observador. Las mediciones de la concentración de azúcar ( $C_s$ ), tomadas con un refractómetro digital, fueron consideradas como señales de entrada para los modelos del observador (15) y (16). Es importante destacar que cuando los valores estimados ( $\hat{C}_s$  y  $\hat{k}$ ) convergen a las variables de estado ( $C_s, k$ ), el observador (15)-(16) se reduce al modelo de transporte (14).

Permitiendo que  $e_s \triangleq C_s - \hat{C}_s$  y  $e_k \triangleq k - \hat{k}$  representen el error de estimación de  $\hat{C}_s$  y  $\hat{k}$ , respectivamente. Si se dan condiciones tales que los valores estimados ( $\hat{C}_s, \hat{k}$ ) converjan ( $C_s, k$ ), equivale a determinar valores para los parámetros  $\omega$  y  $\gamma$  tales que la dinámica del error converja a cero.

$$\frac{de_s}{dt} = -\omega e_s + (C_s^\infty - C_s) e_k \quad (17)$$

$$\frac{de_k}{dt} = -\gamma C_s e_s + \frac{dk}{dt} \quad (18)$$

Teniendo en cuenta que las variables medidas  $C_s^\infty$  y  $C_s$  son señales conocidas, hay que señalar que la dinámica del error (17)-(18) es lineal con respecto a las variables de estado ( $e_s, e_k$ ). Así, para garantizar que el sistema (17)-(18) converge a cero, los parámetros  $\omega$  y  $\gamma$  se fijaron en:

$$\omega = 2\lambda \quad (19)$$

$$\gamma = \frac{\lambda^2}{C_s(C_s^\infty - C_s)}, \quad (20)$$

donde  $\lambda < 0$  es un parámetro arbitrario que permite regular la tasa de convergencia del observador. De las Ecuaciones (19) y (20) se deduce que el sistema de Ecuaciones diferenciales (17)-(18) es globalmente estable de forma asintótica (Luo *et al.*, 2004). Como el sistema (17)-(18) es estable, los errores de estimación convergen a cero, haciendo que las variables estimadas ( $\hat{C}_s, \hat{k}$ ) converjan a ( $C_s, k$ ).

Cabe mencionar que la magnitud del parámetro  $\lambda$  en (19)-(20) puede elegirse para que las trayectorias de error en (17)-(18) converjan rápidamente a cero. Sin embargo, si el error converge rápidamente a cero, el observador (15)-(16) será muy sensible a perturbaciones como el ruido experimental (Ortega *et al.*, 2019). El observador (15)-(16) fue diseñado en nuestros experimentos considerando un equilibrio entre el seguimiento de la señal  $\hat{c}_s$  y el seguimiento del error experimental. El valor de  $\lambda$  se eligió así para minimizar la función de error.

$$\text{Error} = \sum_{i=1}^N [\hat{c}_{s,i} - c_{s,i}]^2 + \phi \sum_{i=1}^{N-1} [\hat{k}_{i+1} - \hat{k}_i]^2. \quad (21)$$

En la Ecuación (21), el primer término de la derecha rastrea el error de convergencia, el segundo término rastrea el error de ruido experimental, y el parámetro  $\phi$  establece la sensibilidad del observador al ruido experimental. El observador (15)-(16) se integró utilizando un método basado en Runge-Kutta (rutina de integración ode45, Matlab R2020b). El valor de  $\lambda$  se eligió minimizando (21) considerando  $\phi = 9 \times 10^6$ .

### 2.2.5 Análisis de datos

Se realizaron regresiones no lineales y lineales con Matlab (Matlab R2020b Statistic Toolbox 7.3, MathWorks Inc., Natick, MA, EE. UU.). La idoneidad de los modelos propuestos se cuantificó y comparó mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el chi-cuadrado reducido ( $\chi^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los valores de  $\chi^2$  y RMSE se determinaron mediante las Ecuaciones (23) y (24). Los valores más bajos de  $\chi^2$  y RMSE y los valores más altos de  $R^2$  conducen a una mejor bondad de ajuste (Allahdad *et al.*, 2019; Prithani y Dash, 2020). La significancia estadística de las estimaciones de los parámetros no lineales se evaluó a través de sus intervalos de confianza del 95 %. Se realizó un ANOVA para comparar los valores de difusividad estimados y los estimadores basados en el observador de Luenberger al variar la concentración de la solución osmótica o el tipo de soluto.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [O_i - E_i]^2}{N - z} \quad (22)$$

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N [O_i - E_i]^2}{N} \right]^{0.5} \quad (23)$$

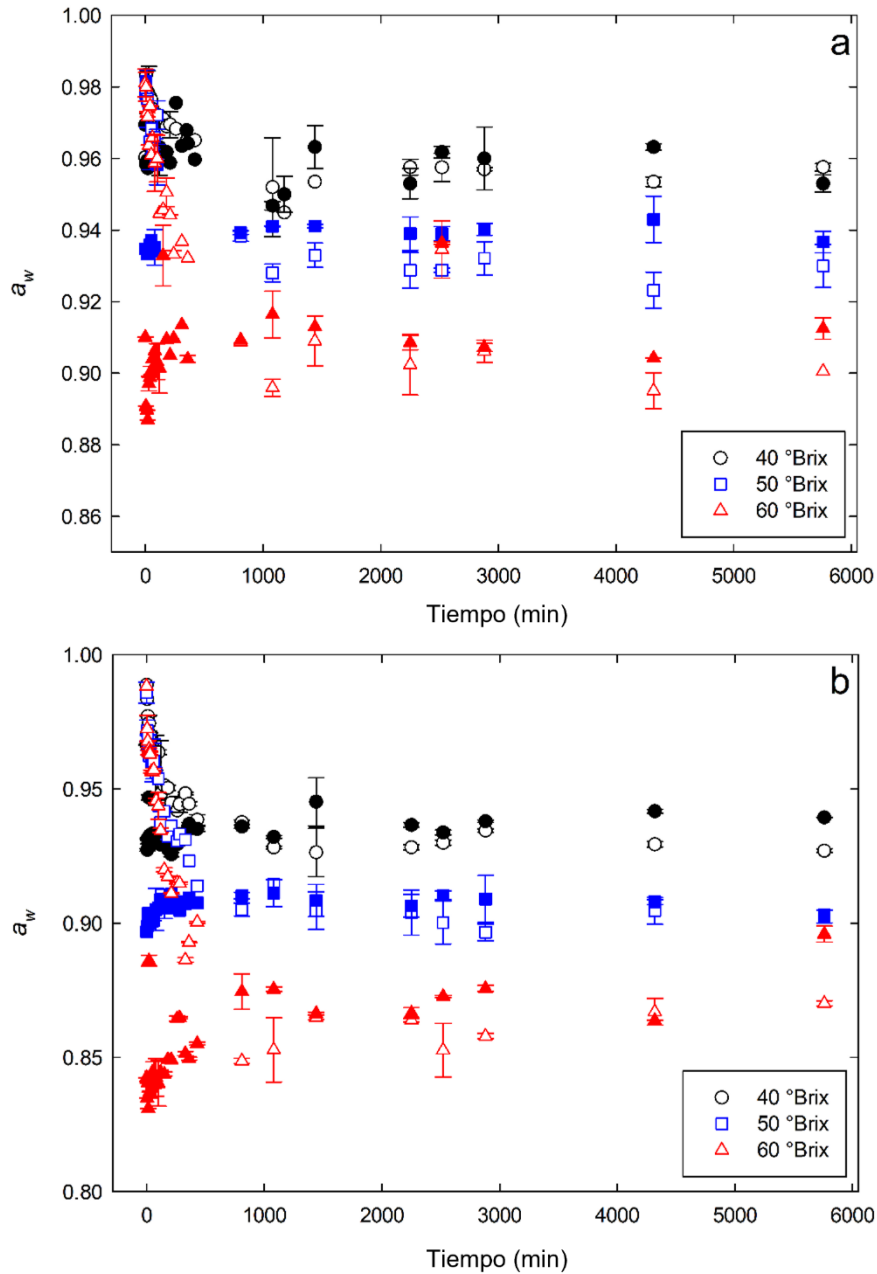
## 2.3 Resultados y discusión

### 2.3.1 Actividad de agua y sólidos solubles durante la osmodeshidratación

En la **Figura 2.3.1** se muestra la evolución de la  $a_w$  correspondiente a los cubos de manzana (puntos huecos,  $a_w$ , producto) y de la  $a_w$  correspondiente a las soluciones osmóticas (puntos sólidos,  $a_w$ , solución osmótica) durante 5760 min de proceso de deshidratación osmótica a 40 °C (a: soluciones osmóticas de sacarosa; b: soluciones de jugo concentrado de manzana). Los valores iniciales de la solución osmótica para las soluciones de sacarosa oscilaron entre 0.890 y 0.969, y los correspondientes al jugo concentrado de manzana entre 0.842 y 0.967. El tipo y la concentración de la solución osmótica mostraron un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre la  $a_w$  de la solución osmótica, que disminuyó al aumentar la concentración de la solución osmótica (González-Pérez *et al.*, 2021).

El equilibrio osmótico de las muestras osmodeshidratadas se alcanzó cuando la  $a_w$ , producto, y la  $a_w$ , solución osmótica no tuvieron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (González-Pérez *et al.*, 2021). La  $a_w$ , producto disminuyó de  $0.984 \pm 0.004$  a  $0.898 - 0.961$  (después de 810 - 1180 min) y  $0.855 - 0.940$  (después de 810 - 1080 min) utilizando soluciones de sacarosa y jugo de manzana concentrado, respectivamente. Este comportamiento fue similar al reportado por Ayala-Aponte *et al.* (2018). Ellos analizaron la evolución de la  $a_w$  de cilindros de mango verde (15 mm de diámetro  $\times$  15 mm de largo) y diferentes soluciones osmóticas (40 g de NaCl / 100 g de solución y 40 °Brix) durante el proceso de deshidratación osmótica a 30 °C. Los autores observaron que cuando la  $a_w$  del producto está más cerca de la  $a_w$  de la solución osmótica, la transferencia de masa es más lenta porque la fuerza motriz se reduce hasta alcanzar un estado de equilibrio. Además, en la **Figura 2.3.1** se puede observar que, para las concentraciones estudiadas de la solución osmótica, la relación de masas de la solución osmótica y el producto de 10: 1 no diluyó excesivamente la solución debido a la reducción de  $a_w$ , producto.

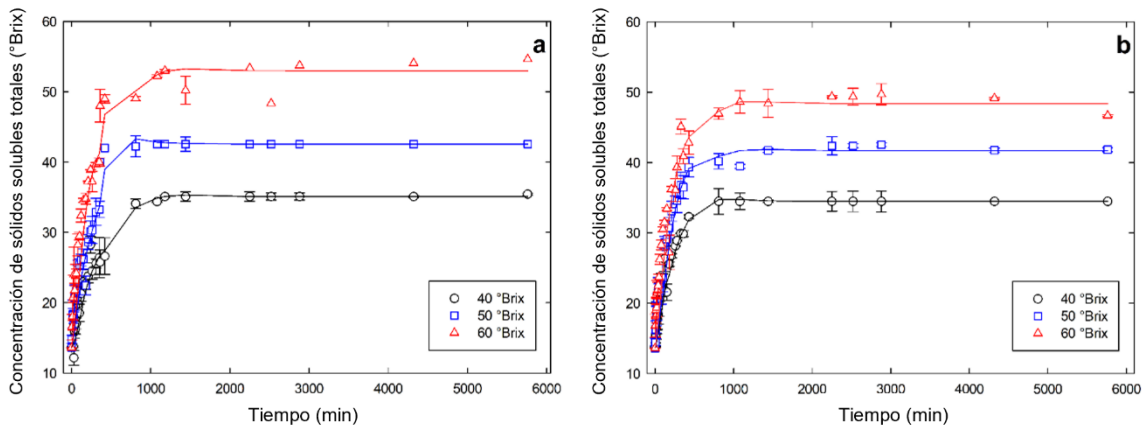




**Figura 2.3.1** Actividad de agua de los cubos de manzana (puntos vacíos) y de las soluciones osmóticas (puntos sólidos) durante la deshidratación osmótica con diferentes medios osmóticos a 40 °C. **(a)** sacarosa y **(b)** jugo concentrado de manzana.

La reducción de la  $a_w$  del producto estuvo relacionada con la concentración de la solución osmótica. El aumento de la concentración de la solución promueve una mayor reducción de la humedad y conduce a una mayor incorporación de solutos por el producto (de Mello Jr *et al.*, 2019). La **Figura 2.3.2** muestra la evolución de los sólidos solubles

totales de los cubos de manzana ( $TSS_0 = 13.6 \pm 1.9$  °Brix) durante el proceso de deshidratación osmótica. Durante este proceso simultáneo, cuando la  $a_w$ , producto disminuye, los sólidos solubles totales de la muestra aumentan hasta alcanzar un estado de equilibrio. Además, este comportamiento se ve favorecido por el aumento de la concentración de la solución osmótica. Algunos autores han informado que la transferencia de masa de agua es mayor que la transferencia de masa de soluto (Khubber *et al.*, 2020).



**Figura 2.3.2** Evolución del estado medido (puntos) y del estado estimado (líneas) de la concentración total de sólidos solubles durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando (a) soluciones de sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana a 40 °C. Línea continua, resultado del observador para  $\lambda = -0.4$ .

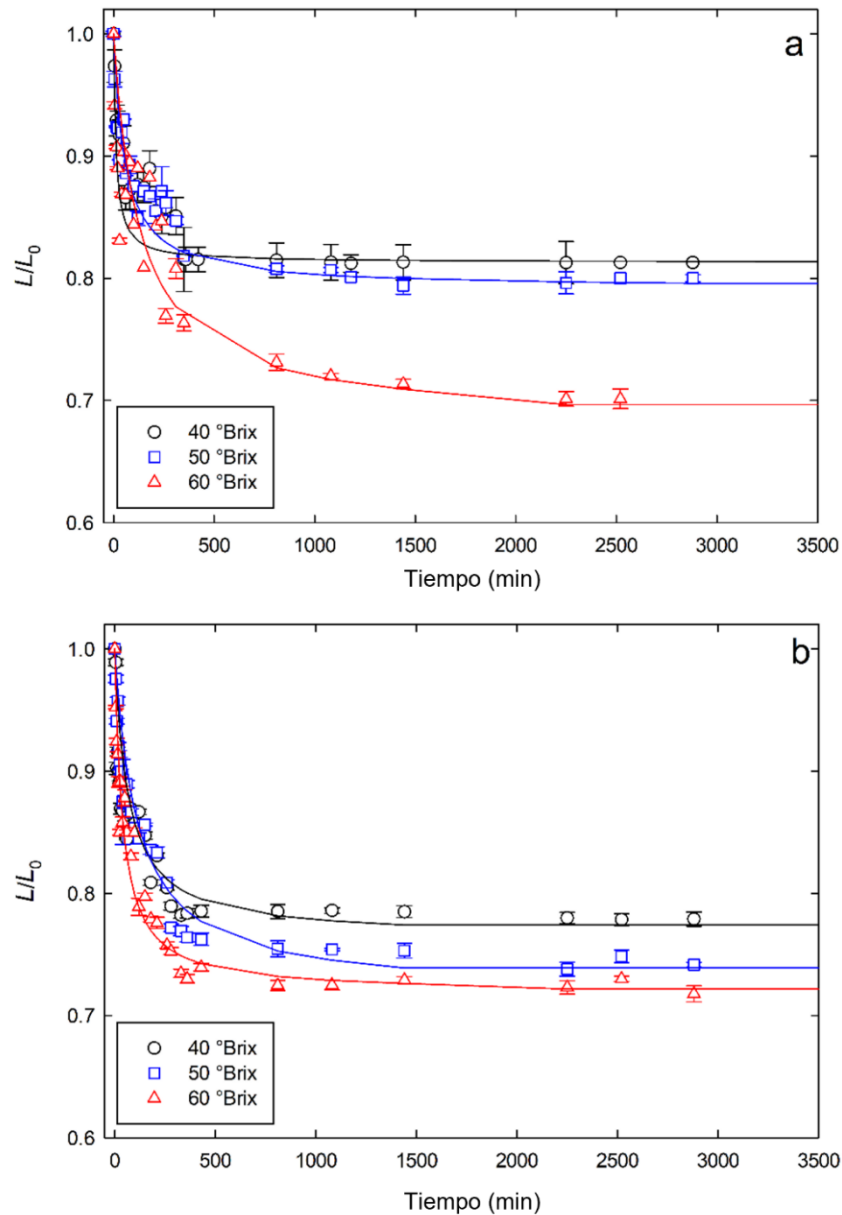
La porosidad de la fruta (en el caso de la manzana puede estar en torno al 25 %, González-Pérez *et al.*, 2021) sometida a deshidratación osmótica podría tener un impacto en el proceso, ya que influiría en la transferencia de solutos desde las soluciones osmóticas, pero este impacto es mayor si el proceso se realiza a presiones reducidas (González-Pérez *et al.*, 2022). Se analizó la variación del pH de la solución osmótica y de los cubos de manzana osmodeshidratados en el estado de equilibrio osmótico. Los valores iniciales de pH de la solución osmótica no presentaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) debido a la concentración de sacarosa ( $pH = 6.28 \pm 0.12$ ) o al jugo concentrado de manzana ( $pH = 3.55 \pm 0.01$ ). Sin embargo, en la condición de equilibrio osmótico, los cubos de manzana fresca ( $pH = 4.0 \pm 0.01$ ) aumentaron su pH directamente con el aumento de la concentración de sacarosa ( $pH = 4.12 \pm 0.01$ ,  $4.29 \pm 0.01$  y  $4.44 \pm 0.01$  con 40, 50 y 60 °Brix,

respectivamente), esto es probablemente debido a la lixiviación de algunos ácidos orgánicos (Paes *et al.*, 2019). Algunos autores informan que, al aumentar la concentración de la solución osmótica, la pérdida de agua y de algunos ácidos orgánicos aumenta durante el proceso de osmodeshidratación (González-Pérez *et al.*, 2021). Por otro lado, los valores de pH de las muestras osmodeshidratadas con jugo concentrado de manzana no presentaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) con respecto al valor de la muestra fresca. Además, el valor de pH de las soluciones de jugo concentrado de manzana tuvo diferencias no significativas ( $p > 0.05$ ) con respecto a su valor inicial.

### 2.3.2 Encogimiento y deformación de cubos de manzana

Las Figuras 2.3.3-2.3.5 muestran la evolución de los datos de contracción correspondientes a cubos de manzana osmodeshidratados (40 °C) en soluciones de sacarosa (Figuras 2.3.3.a y 4) y en jugo concentrado de manzana (Figuras 2.3.3.b y 2.3.5). El encogimiento se analizó con la longitud característica adimensional (longitud media de la muestra a un determinado tiempo de inmersión / longitud media del cubo fresco,  $L / L_0$ ) a diferentes tiempos de inmersión. El uso de soluciones osmóticas con concentraciones más altas (menor  $a_w$ , solución osmótica) aumentó el encogimiento del cubo de manzana. Las muestras osmodeshidratadas con 60 °Brix de jugo concentrado de manzana alcanzaron una mayor contracción que las muestras osmodeshidratadas en soluciones de sacarosa a 60 °Brix; este comportamiento se atribuye a la  $a_w$ , solución osmótica (Ayala-Aponte *et al.*, 2018). Para ambos tipos de solución osmótica, el valor  $L/L_0$  fue modificado principalmente por la concentración de la solución osmótica. El uso de una alta concentración de la solución osmótica aumentó la reducción de  $L / L_0$ . Además, los valores de  $L / L_0$  para los experimentos en los que se utilizaron 60 °Brix de jugo concentrado de manzana y 40 °Brix de solución de sacarosa fueron similares, lo que implica que la composición del medio osmótico afecta al encogimiento del producto. Por lo tanto, los resultados experimentales de  $L / L_0$  se agruparon según la concentración de cada solución osmótica y se ajustaron con la Ecuación (4), que se utilizó en la simulación de los datos de transferencia de masa. Los parámetros de ajuste se muestran en la Tabla 2.3.1. Para todos los experimentos, se logró

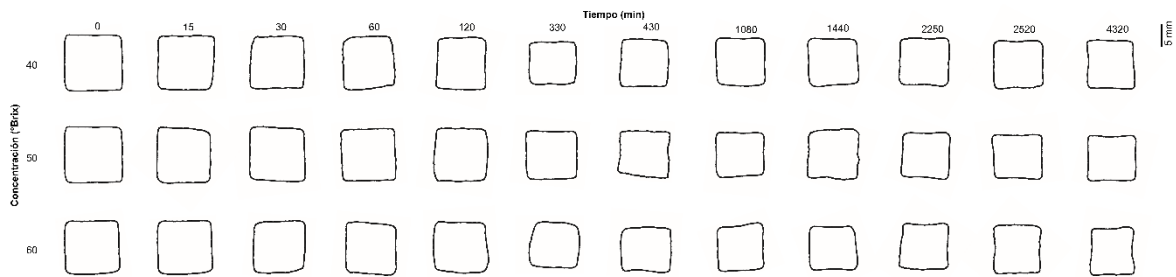
un ajuste satisfactorio a los datos experimentales ( $R^2 > 0.900$ ,  $RMSE < 0.044$ , y  $\chi^2 < 0.002$ ).



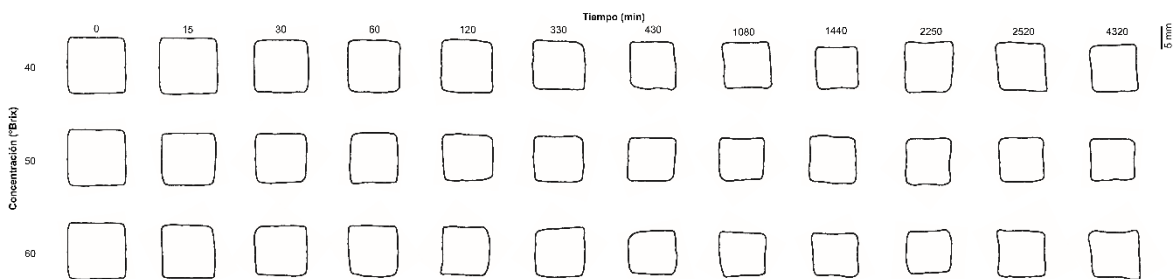
**Figura 2.3.3** Evolución experimental (puntos) y ajustada (línea) de la longitud característica adimensional de los cubos de manzana durante el proceso de deshidratación osmótica en diferentes medios a 40 °C. (a) sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana.

**Tabla 2.3.1** Parámetros de contracción de cubos de manzana durante la deshidratación osmótica.

Solución osmótica		Parámetros del modelo				
Tipo, $m$	Concentración, $n$ (°Brix)	$v_{m,n}$ (adimensional)	$v_{m,n}$ (1 / s)	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
Sacarosa	40	0.19	0.00131	0.970	0.038	0.002
	50	0.21	0.00029	0.980	0.022	0.001
	60	0.23	0.00033	0.900	0.027	0.001
Jugo concentrado de manzana	40	0.24	0.00025	0.990	0.044	0.002
	50	0.28	0.00015	0.980	0.039	0.000
	60	0.28	0.00042	0.990	0.020	0.000



**Figura 2.3.4** Deformación promedio de los cubos de manzana durante el proceso de deshidratación osmótica utilizando soluciones de sacarosa a 40 °C.



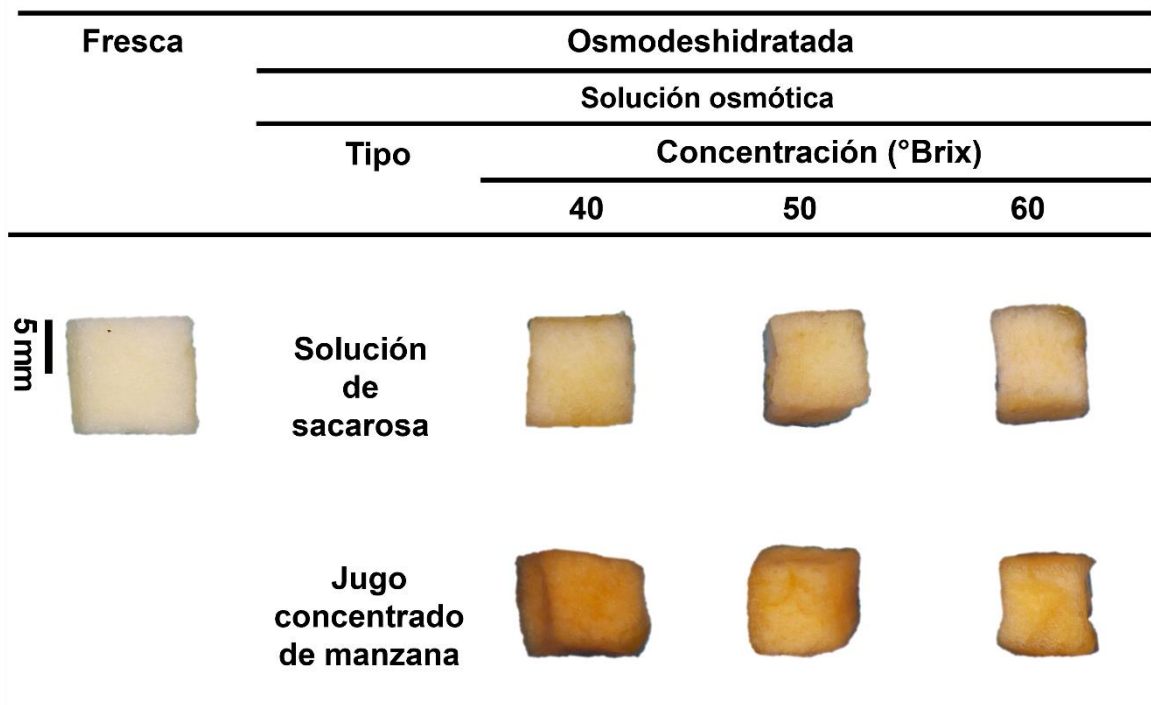
**Figura 2.3.5** Deformación promedio de los cubos de manzana durante el proceso de deshidratación osmótica utilizando jugo concentrado de manzana a 40 °C.

En este estudio se observó una reducción de volumen en el estado de equilibrio para la deshidratación osmótica con soluciones de sacarosa que oscilaba entre el 46.02 y el 53.63 % (disminución de volumen estimada al observar que  $V / V_0 \propto [L / L_0]^3$ ). Souraki *et al.* (2014) osmodeshidrataron rodajas de manzana Golden (5 mm de grosor  $\times$  65 mm de diámetro) con soluciones de sacarosa (30 - 50 °Brix y 30 - 50 °C). Se encontró una reducción de volumen de aproximadamente el 25 % ( $L / L_0 \approx 0.91$ ) después de 360 min. En el caso de la osmodeshidratación con jugo concentrado de manzana, las muestras alcanzaron una reducción de volumen entre el 49 y el 63 %; estos datos son comparables a los reportados por otros autores para manzana *Granny Smith*, osmodeshidratada con jugo de betabel (Aguirre-García *et al.*, 2020).

La descripción representativa de los cambios de forma de los cubos de manzana en general a diferentes tiempos de inmersión se presenta en las **Figuras 2.3.4 y 2.3.5**. Todas las muestras se encogieron y cambiaron ligeramente su forma durante el proceso hasta alcanzar un estado de equilibrio. Las muestras con mayor cambio de forma fueron las osmodeshidratadas con soluciones osmóticas de 60 °Brix. A esta concentración, el cambio de forma de las muestras se describió como un ligero efecto de esquina, consistente en una contracción más acentuada a mitad de cada lado del perímetro representativo. Por el contrario, las contracciones son menos pronunciadas en los bordes (Mayor *et al.*, 2011). Este comportamiento se asocia principalmente a la eliminación de agua de la matriz alimenticia, que sufre un colapso estructural. Zou *et al.* (2013) encontraron resultados similares con rodajas de mango osmodeshidratadas (solución de sacarosa de 65 °Brix a 30 °C y tiempo de inmersión de 30 y 60 min) y secadas (secado convectivo a 50 °C). La deformación estructural de las rodajas de mango presentó deformaciones y ligeras esquinas relacionadas con la distribución no homogénea y la reducción del contenido de humedad.

En la **Figura 2.3.6** y en la **Tabla 2.3.2** se muestra una comparación del aspecto general y de los parámetros de color de la manzana fresca y osmodeshidratada en equilibrio con soluciones de sacarosa y de jugo concentrado de manzana. La osmodeshidratación provocó un cambio significativo ( $p < 0.05$ ) en la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) con respecto a las muestras frescas. La  $\Delta E$  aumentó ( $p < 0.05$ ) con el incremento de la concentración de la solución osmótica. Además, las muestras osmodeshidratadas con soluciones de sacarosa

mostraron una menor  $\Delta E$ . Asimismo, las coordenadas cromáticas  $a^*$  y  $b^*$  de las muestras osmodeshidratadas disminuyeron significativamente con respecto a las frescas. Las muestras frescas y osmodeshidratadas cercanas a  $90^\circ$  en el espacio de color tienen un matiz cercano al amarillo. Los valores de *Chroma* indican una mayor ( $p < 0.05$ ) saturación en las muestras osmodeshidratadas, concretamente en los experimentos con jugo concentrado de manzana. Los valores de  $L^*$  disminuyeron cuando se redujo la concentración de la solución osmótica debido al pardeamiento enzimático en la superficie del producto. Algunos autores han descubierto que el aumento de la concentración de soluto de una solución osmótica reduce el pardeamiento causado por las enzimas debido a la reducción de la  $a_w$  (Moon *et al.*, 2020).



**Figura 2.3.6** Aspecto general de la manzana fresca y osmodeshidratada en equilibrio con soluciones de sacarosa y jugo concentrado de manzana.

**Tabla 2.3.2** Parámetros de color de la manzana osmodeshidratada en equilibrio con soluciones de sacarosa y jugo concentrado.

Tipo	Concentración (°Brix)	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\bullet Hue$	<i>Croma</i>	$\Delta E$
Sacarosa	40	66.21 ± 4.83 <sup>bc, A</sup>	-2.41 ± 0.81 <sup>b, B</sup>	25.32 ± 6.31 <sup>a, B</sup>	95.91 ± 2.75 <sup>a, A</sup>	25.5 ± 6.24 <sup>a, B</sup>	31.7 <sup>a, B</sup>
	50	61.93 ± 0.88 <sup>c, X</sup>	2.36 ± 1.89 <sup>a, Y</sup>	25.76 ± 2.25 <sup>a, Y</sup>	84.63 ± 3.27 <sup>b, X</sup>	25.9 ± 2.17 <sup>a, Y</sup>	29.3 <sup>b, Y</sup>
	60	70.89 ± 0.76 <sup>ab, α</sup>	0.40 ± 0.32 <sup>a, α</sup>	24.90 ± 1.64 <sup>a, β</sup>	89.075 ± 8.47 <sup>a, b, α</sup>	24.9 ± 1.64 <sup>a, β</sup>	24.6 <sup>c, β</sup>
Jugo concentrado de manzana	40	57.75 ± 2.47 <sup>y, B</sup>	6.71 ± 0.65 <sup>x, A</sup>	35.53 ± 1.79 <sup>y, A</sup>	79.42 ± 6.50 <sup>y, B</sup>	36.2 ± 1.88 <sup>x, A</sup>	40.3 <sup>x, A</sup>
	50	57.81 ± 3.32 <sup>y, X</sup>	6.06 ± 0.89 <sup>x, X</sup>	35.71 ± 1.11 <sup>y, X</sup>	80.24 ± 4.36 <sup>x, y, X</sup>	36.2 ± 2.10 <sup>x, X</sup>	39.1 <sup>y, X</sup>
	60	68.25 ± 2.26 <sup>x, α</sup>	1.93 ± 0.09 <sup>y, α</sup>	33.33 ± 0.96 <sup>y, α</sup>	85.93 ± 4.39 <sup>x, α</sup>	33.4 ± 0.95 <sup>x, α</sup>	34.2 <sup>z, α</sup>

Letras minúsculas en la misma columna (a, b, c, o x, y) indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) al comparar en tipo de soluto a diferentes concentraciones. Letras mayúsculas en la misma columna (A, B, o X, Y o α, β) indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) al comparar entre tipos de solutos a la misma concentración.  $\Delta E$  es la diferencia total de color con respecto a la muestra fresca considerando  $L_0^* = 75.43 \pm 3.26$ ;  $a_0^* = -4.55 \pm 2.20$ ;  $b_0^* = 14.55 \pm 0.00$  ( $\bullet Hue_0 = 107.4 \pm 7.86$  y  $Croma_0 = 15.2 \pm 0.66$ ).



### 2.3.3 Características de transferencia de masa de cubos de manzana

#### 2.3.3.1 Parámetros de equilibrio

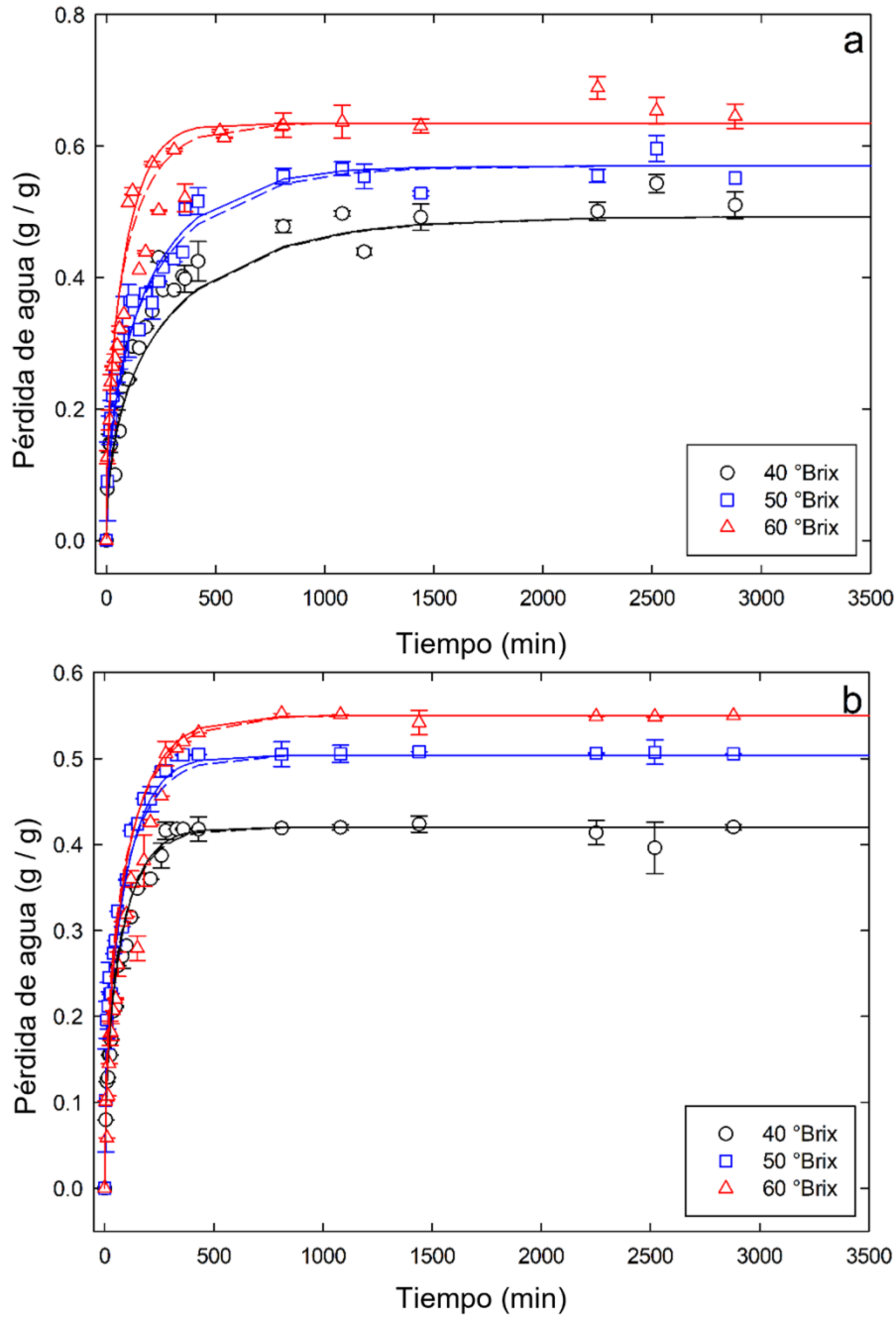
La evolución de la pérdida de agua y la ganancia de solutos durante la deshidratación osmótica de los cubos de manzana (con soluciones de sacarosa o de jugo concentrado de manzana) se muestra en las **Figuras 2.3.7 y 2.3.8**, respectivamente. La mayor pérdida de agua experimental se produjo en el intervalo de 0.49 – 0.64 y 0.43 – 0.56 g de agua / g de producto fresco para los experimentos con soluciones de sacarosa y jugo concentrado de manzana, respectivamente. Los valores máximos de ganancia de solutos experimentales alcanzados variaron entre 0.13 y 0.20 y 0.09 y 0.11 g de soluto / g de producto fresco. Estos valores fueron similares a los parámetros correspondientes a la transferencia de masa en equilibrio ( $\Delta_{A,e} = WL_e$  y  $\Delta_{S,e} = SG_e$ ) estimados por regresión lineal con el modelo de Azuara (**Tabla 2.3.3**). El uso de altas concentraciones de la solución osmótica produce una mayor pérdida de agua y ganancia de solutos ( $p < 0.05$ ). Los valores de  $WL_e$  y  $SG_e$  de los experimentos con soluciones de sacarosa fueron superiores a los valores de los experimentos con jugo concentrado de manzana. Además, según las propiedades coligativas de una solución, el jugo concentrado de manzana como medio osmótico puede reducir la actividad del agua en el producto osmodeshidratado sin favorecer su ganancia de solutos ya que el número de componentes es mayor que en una solución de sacarosa con el mismo peso. Peng *et al.* (2019) osmodeshidrataron zanahoria (*Daucus carota* var. *Heitianwucun*) con 71.5 °Brix de jugo concentrado de manzana y solución de sacarosa a 25 °C considerando 4 g de solución osmótica / g de producto. El valor  $WL_e$  de las zanahorias osmodeshidratadas ( $WL_e = 0.70$  g de agua / g de producto fresco) tuvo diferencias no significativas entre los tipos de solución osmótica. El valor  $SG_e$  de la zanahoria osmodeshidratada con jugo concentrado de manzana fue superior al obtenido en el experimento con solución de sacarosa ( $SG_e$  de 0.183 y 0.175 g de solutos / g de producto fresco para el jugo concentrado de manzana y la solución de sacarosa, respectivamente). Lech *et al.* (2017) osmodeshidrataron manzanas con soluciones de sacarosa y lograron un  $SG_e$  de 0.088 g de solutos / g de producto fresco y un  $WL_e$  de 0.367 g de agua / g de producto fresco. Los productos osmodeshidratados con jugo concentrado de *chokeberry* se caracterizaron por un  $WL_e$  de 0.445 g de agua / g de producto fresco y un  $SG_e$  de 0.071 g de

soluto / g de producto fresco. González-Pérez *et al.* (2021) osmodeshidrataron pera (var. *Green Anjou*) con 50 °Brix de jugo concentrado de uva a 40 °C alcanzando valores de  $WL_e$  y  $SG_e$  de 0.552 g de agua / g de producto fresco y 0.093 g de solutos / g de producto fresco, respectivamente.

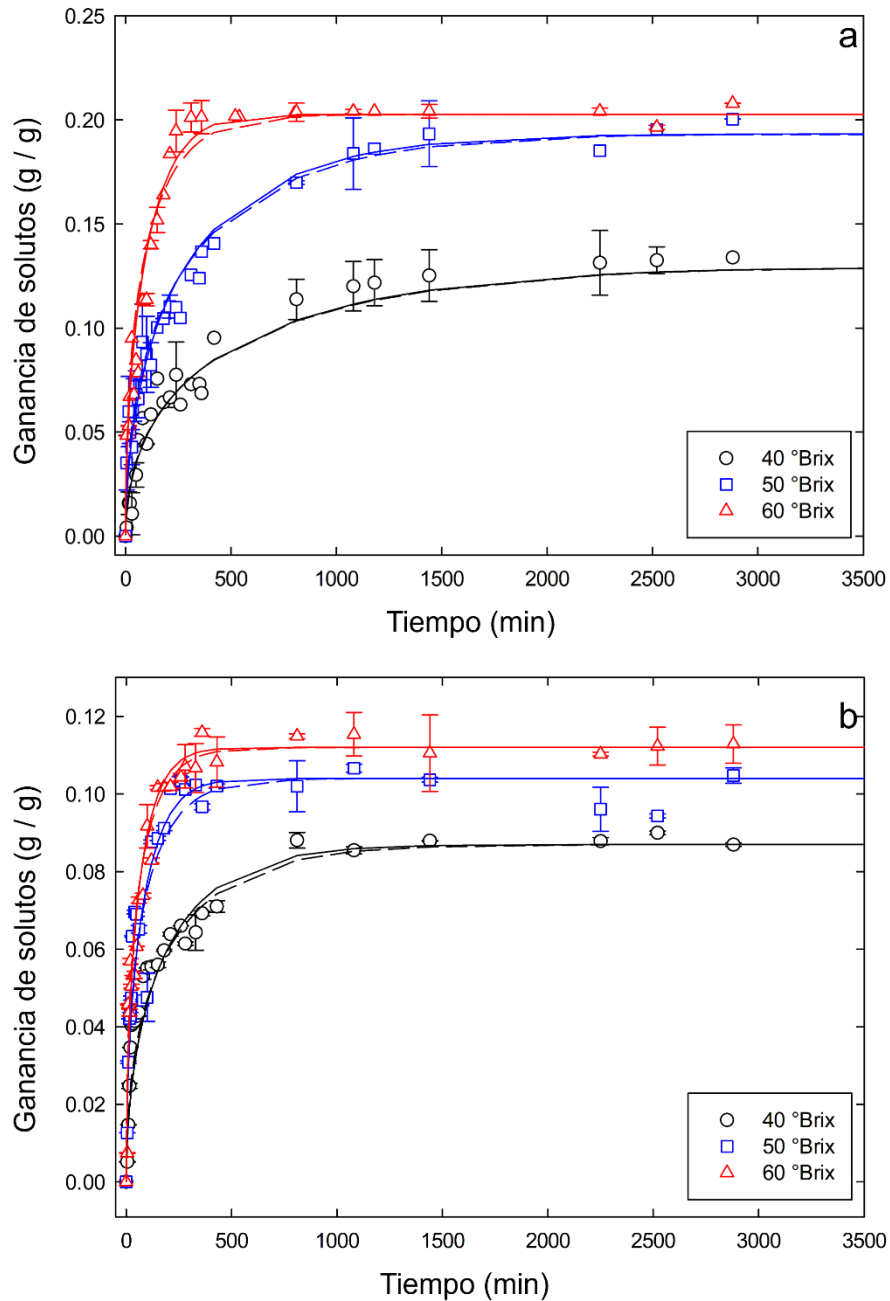
**Tabla 2.3.3** Parámetros del modelo de Azuara durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana.

Transferencia de masa	Solución osmótica		$\beta_i$ (1 / s)	$\Delta_{i,e}$ (g / g)	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
	Tipo	Concentración (°Brix)					
<i>Pérdida de agua</i>	Sacarosa	40	0.00021	0.49	0.990	0.039	0.002
		50	0.00024	0.57	0.990	0.048	0.002
		60	0.00066	0.64	0.990	0.061	0.004
	Jugo concentrado de manzana	40	0.00055	0.43	0.990	0.081	0.077
		50	0.00076	0.51	0.990	0.034	0.001
		60	0.00029	0.56	0.990	0.033	0.001
<i>Ganancia de solutos</i>	Sacarosa	40	0.00008	0.13	0.970	0.009	0.001
		50	0.00019	0.19	0.910	0.015	0.001
		60	0.00011	0.20	0.980	0.017	0.001
	Jugo concentrado de manzana	40	0.00031	0.09	0.990	0.007	0.001
		50	0.00225	0.10	0.990	0.018	0.001
		60	0.00042	0.11	0.990	0.017	0.001

$${}^a t / WL = 1 / (\beta_A WL_e) + t / WL_e; {}^b t / SG = 1 / (\beta_S SG_e) + t / SG_e$$



**Figura 2.3.7** Evolución de la pérdida de agua experimental (puntos) y simulada (líneas) durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando (a) soluciones de sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana a 40 °C. Línea continua, modelo con contracción y línea.



**Figura 2.3.8** Evolución de la ganancia de solutos experimental (puntos) y simulada (líneas) durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando (a) soluciones de sacarosa y (b) jugo concentrado de manzana a 40 °C. Línea continua, modelo con contracción y líneas punteadas, modelo sin contracción.

La relación entre la pérdida de agua y la ganancia de solutos en equilibrio ( $WL_e / SG_e$ ) para los experimentos con sacarosa ( $WL_e / SG_e = 2.95 - 3.78$  g de agua / g de solutos) y el jugo concentrado de manzana ( $WL_e / SG_e = 4.84 - 5.19$  g de agua / g de solutos) fue mayor que 1; por lo que hay menos ganancia de solutos que pérdida de agua. Eso indica que el tratamiento es adecuado como pretratamiento para el secado convectivo (Allahdad *et al.*, 2019). Estos resultados fueron similares a los reportados por Lech *et al.* (2017). Los autores encontraron una relación  $WL_e / SG_e$  de 4.17 y 6.28 g de agua / g de solutos para manzanas osmodeshidratadas (var. *Champions*) (40 °Brix y 45 °C) con soluciones de sacarosa y jugo concentrado de *chokeberry*, respectivamente.

### 2.3.3.2 Modelo difusivo

La solución de la segunda ley de Fick para la deshidratación osmótica permite predecir la distribución de agua y solutos en los cubos de manzana. La **Tabla 2.3.4** muestra los valores de difusividad del agua y de los solutos (con y sin encogimiento) y los puntos de equilibrio para la pérdida de agua y la ganancia de solutos. Para calcular la difusividad efectiva del agua y los solutos con contracción, se consideró la variación de las dimensiones del producto en función del tiempo (con los parámetros calculados de la **Tabla 2.3.1**). Las difusividades estimadas se vieron significativamente afectadas ( $p < 0.05$ ) por la concentración ensayada y el tipo de solución utilizada; la difusividad aumenta cuando se utiliza jugo concentrado de manzana como solución osmótica, ya que contiene solutos de menor peso molecular que se difunden más fácilmente. Una mayor difusividad implica una cinética de transferencia de masa más rápida. El modelo mostró un buen ajuste a los datos experimentales (**Figuras 2.3.7 y 2.3.8**,  $R^2 = 0.770 - 0.990$ ). Para los experimentos con soluciones de sacarosa, la difusividad del agua cuando se incluye el encogimiento en la simulación se estimó en el rango de  $1.26 - 3.10 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> / s, mientras que las difusividades de los solutos están entre  $0.68 - 3.53 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> / s. Los valores de difusividad estimados con corrección (del encogimiento) para los experimentos con soluciones de jugo concentrado de manzana están en los rangos de  $3.14 - 5.05 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> / s para la difusividad del agua y entre  $1.55 - 19.35 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> / s para la difusividad de los solutos. La inclusión del encogimiento del producto dentro del modelo de deshidratación osmótica para calcular las difusividades

causó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en comparación con los modelos sin considerarla. Se observó que, para cada curva de transferencia de masa simulada, el no considerar el encogimiento del producto genera una sobreestimación del 29.9 – 76.8 % para la difusividad del agua y del 25.3 – 52.8 % para la difusividad de los solutos. Resultados similares se encontraron en otros estudios con manzanas *Granny Smith* y *Gala* (Aires *et al.*, 2018).

La **Tabla 2.3.5** muestra un resumen de los coeficientes de difusividad estimados en algunas frutas y hortalizas osmodeshidratadas con jugo de frutas y soluciones de sacarosa. Estos valores se encuentran dentro de un rango amplio de  $10^{-9}$  y  $10^{-12}$  como se espera para los alimentos osmodeshidratados. Los valores de difusividad obtenidos en los experimentos con soluciones de jugo concentrado de manzana son similares a los obtenidos con una solución de 50 °Brix de jugo concentrado de uva (González-Pérez *et al.*, 2021). Por otro lado, los valores de difusividad obtenidos en este estudio para los experimentos con soluciones de sacarosa son similares a los reportados para manzana (var. *Gala*), mango verde (var. *Filipino*), jengibre, uchuva y *black jamun* osmodeshidratados en condiciones similares (Aires *et al.*, 2018; Ayala-Aponte *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2019 Luchese *et al.*, 2015; Sharma y Dash, 2019). Los coeficientes de difusividad para la osmodeshidratación de la manzana (var. *Gala*), la mandarina (var. *Kinnow*) y la uchuva aumentaron con el incremento de la concentración de sacarosa (Aires *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2019; Luchese *et al.*, 2015), este comportamiento fue similar al obtenido en este estudio. Por otro lado, para la estimación de los valores de difusividad algunos autores asumen como condición de equilibrio de transferencia de masa al último tiempo de inmersión (George *et al.*, 2016); sin embargo, esto podría generar una sobreestimación de los parámetros de difusividad, ya que al inicio del proceso la diferencia entre la concentración de la matriz alimentaria y la solución osmótica es mayor.

**Tabla 2.3.4** Coeficientes de difusividad estimados durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana.

Transferencia de masa	Solución osmótica		Con encogimiento <sup>a</sup>				Sin encogimiento <sup>a</sup>				$(D_i)^{**}$ % error
	Tipo	Concentración (°Brix)	$D_i \times 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$	$D_i \times 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$	
<b>Agua</b> ( $i = A$ )	Sacarosa	40	1.26 (1.24 / 1.28) <sup>c, B</sup>	0.990	0.023	0.001	1.77 (1.35 / 2.03) <sup>c, B</sup>	0.950	0.036	0.001	39.8
		50	1.69 (1.67 / 1.71) <sup>b, Y</sup>	0.980	0.042	0.002	2.47 (2.42 / 2.49) <sup>b, Y</sup>	0.970	0.033	0.001	46.0
		60	3.10 (3.00 / 3.20) <sup>a, <math>\alpha</math></sup>	0.970	0.046	0.002	5.48 (5.26 / 5.70) <sup>a, <math>\beta</math></sup>	0.970	0.032	0.001	76.8
	Jugo concentrado de manzana	40	5.05 (4.62 / 5.48) <sup>x, A</sup>	0.990	0.031	0.001	7.11 (6.48 / 7.75) <sup>x, A</sup>	0.980	0.037	0.002	41.0
		50	4.72 (4.64 / 4.80) <sup>x, X</sup>	0.990	0.020	0.001	6.13 (5.65 / 6.62) <sup>x, y, X</sup>	0.990	0.018	0.001	29.9
		60	3.14 (3.12 / 3.17) <sup>y, <math>\alpha</math></sup>	0.970	0.035	0.001	5.22 (4.97 / 5.46) <sup>y, <math>\alpha</math></sup>	0.960	0.011	0.001	65.9
<b>Solutos</b> ( $i = S$ )	Sacarosa	40	0.68 (0.67 / 0.70) <sup>c, B</sup>	0.990	0.004	0.001	1.02 (1.01 / 1.02) <sup>c, B</sup>	0.990	0.004	0.001	48.6
		50	1.14 (1.13 / 1.15) <sup>b, Y</sup>	0.970	0.042	0.002	1.63 (1.61 / 1.64) <sup>b, Y</sup>	0.940	0.016	0.001	42.9
		60	3.53 (3.51 / 3.55) <sup>a, <math>\beta</math></sup>	0.970	0.012	0.001	5.02 (4.97 / 5.07) <sup>a, <math>\beta</math></sup>	0.960	0.013	0.001	42.1
	Jugo concentrado de manzana	40	1.55 (1.43 / 1.67) <sup>y, A</sup>	0.970	0.052	0.003	2.37 (2.17 / 2.55) <sup>y, A</sup>	0.960	0.006	0.001	52.8
		50	4.82 (4.49 / 5.17) <sup>x, X</sup>	0.917	0.002	0.001	5.88 (4.13 / 7.64) <sup>x, X</sup>	0.772	0.078	0.002	22.0
		60	5.32 (5.21 / 5.43) <sup>x, <math>\alpha</math></sup>	0.960	0.035	0.001	7.96 (7.78 / 8.12) <sup>x, <math>\alpha</math></sup>	0.960	0.035	0.001	49.6

Letras minúsculas en la misma columna (a, b, c, o x, y) indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) al comparar el tipo de soluto a diferentes concentraciones. Letras mayúsculas en la misma columna (A, B, o Y, X) indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) al comparar tipos de solutos a la misma concentración.

Letras minúsculas en la misma columna (a, b, c, o x, y) indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) al comparar el tipo de soluto a diferentes concentraciones. Letras mayúsculas en la misma columna (A, B, o X, Y o  $\alpha, \beta$ ) indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) al comparar tipos de solutos a la misma concentración.

\* Los valores entre paréntesis indican el intervalo de confianza del 95 %. \*\* Diferencias entre las difusividades estimadas con (valor de referencia) y sin considerar el encogimiento del producto.

**Tabla 2.3.5** Resumen de los coeficientes de difusividad estimados durante la deshidratación osmótica de frutas y verduras con soluciones de frutas y soluciones de sacarosa.

Referencia	Producto	Condición de osmodeshidratación	$D \times 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s)}$		Consideraciones del modelo
			Agua	Solutos	
Este trabajo	Manzana ( <i>Malus domestica</i> L., var. <i>Granny Smith</i> ) en cubos	Solución 40-60 °Brix sacarosa	1.26-3.10	0.68-3.53	Geometría cúbica con encogimiento
		osmótica: 40-60 °Brix jugo concentrado de manzana 10 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 810-1180 min	3.14-5.05	1.55-5.32	
González-Pérez et al. (2021)	Peras ( <i>Pyrus communis</i> ,) en cubos	Solución osmótica: 50 °Brix jugo de uva 10 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 2800 min	4.36	3.57	Geometría cúbica sin encogimiento
Aguirre-García et al. (2020)	Manzana ( <i>M. domestica</i> L., var. <i>Granny Smith</i> ) en cuñas	Solución osmótica: 50 °Brix solución de betabel (con una relación de 7 g sacarosa / 6 g agua / 1 g betabel) 15 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 480 min	0.146	0.307	Cuñas con encogimiento
George et al. (2016)	Manzana ( <i>M. pumila</i> , var. <i>Fuji</i> ) en rebanadas	Solución Extracto de Kokum (a una relación de 1 g de pulpa de kokum / 2 g agua acidificada)	15.8	2.2	Placa plana infinita sin encogimiento
		10 - 50 % extracto de kokum y sacarosa 3 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 300 min	14.8-48.4	2.3-19.1	
Prithani y Dash (2020)	Kiwi ( <i>Actinidia deliciosa</i> ) en rebanada	Solución osmótica: 60 °Brix solución binaria (con una relación de 3 g glicerol / 7 g sacarosa) 10 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 300 min	4.33	1.97	Placa plana infinita con encogimiento
Alam et al. (2019)	Mandarina ( <i>Citrus reticulata</i> , var. <i>Kinnow</i> ) en rebanadas	Solución osmótica: 55 - 75 °Brix sacarosa 7 g solución osmótica / g producto, 35 °C, 270 min	9.5-10.1	8.6-10.6	Placa plana sin encogimiento
Aires et al., (2018)	Apple ( <i>M. domestica</i> , var. <i>Gala</i> ) en rebanadas	Solución osmótica: 40 - 60 °Brix sacarosa 15 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 1800 min	1.63-2.78	1.23-2.77	Paralelepípedo con encogimiento
Ayala-Aponte et al. (2018)	Mango verde ( <i>Mangifera indica</i> L., var. <i>Filipino</i> )	Solución osmótica: 40 °Brix sacarosa 20 g solución osmótica / g producto, 30 °C, 300 min	1.00	1.11	Cilindro infinito sin encogimiento
Dash et al (2019)	Jengibre ( <i>Zingiber officinale Roscoe</i> ) en rebanadas	Solución 60 °Brix glucosa	3.22	1.99	Placa plana infinita sin encogimiento
		osmótica: 60 °Brix fructosa 60 °Brix sacarosa	3.62 3.96	1.65 1.42	
Luchese et al. (2015)	Uchuva ( <i>Physalis peruviana</i> L.)	4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 180 min Solución osmótica: 40 - 70 °Brix sacarosa 20 g solución osmótica / g producto, 40 - 70 °C, 600 min	1.40-2.90	0.70-1.10	Geometría esférica sin encogimiento
Sharma y Dash (2019)	Ciruela negra ( <i>Syzygium cumini</i> )	Solución osmótica: 60 °Brix sacarosa 10 g solución osmótica / g producto, 30 - 50 °C, 300 min	4.09-5.03	1.58-2.86	Geometría esférica sin encogimiento



Dash *et al.* (2019) determinaron los coeficientes de difusividad del jengibre osmodeshidratado con soluciones de glucosa (180.16 g / mol), fructosa (180.16 g / mol), y sacarosa (342.3 g / mol) a 60 °Brix. Los valores de difusividad aumentaron en los compuestos con menor peso molecular. Esto explica por qué los coeficientes de difusividad para la manzana osmodeshidratada con jugo concentrado de manzana (en este estudio) fueron mayores que los obtenidos con soluciones de sacarosa. Del mismo modo, Prithani y Dash (2020) añadieron 3 g de glicerol (92.09 g / mol) a 7 g de sacarosa para aumentar los coeficientes de difusividad de las rodajas de kiwi. Sin embargo, Aguirre-García *et al.* (2020) osmodeshidrataron manzana en soluciones de sacarosa con jugo de remolacha; los autores obtuvieron coeficientes de difusividad similares a los reportados para soluciones de sacarosa porque la cantidad de azúcares simples (del jugo) era menor que la de sacarosa.

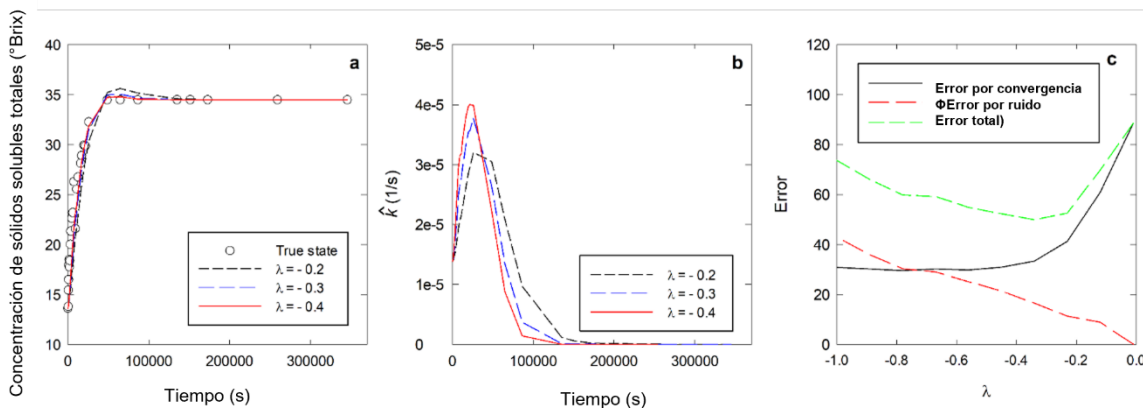
### 2.3.3.3 Modelo de observador de Luenberger

La **Figura 2.3.9** muestra las trayectorias de estado para la concentración estimada de solutos dentro de los cubos de manzana y para el parámetro de transporte de masa estimado para diferentes valores del parámetro de sintonía  $\lambda$  durante la osmodeshidratación de cubos de manzana utilizando 40 °Brix de jugo concentrado de manzana a 40 °C. Para valores de  $\lambda$  cercanos a cero, el observador no predice correctamente la concentración medida de sólidos solubles totales (estado verdadero). Cuanto más se aleja el parámetro  $\lambda$  de cero, se alcanza una mejor predicción del estado verdadero y, en consecuencia, el error de convergencia alcanza su mínimo. Los errores correspondientes a  $\lambda \leq -0.4$  no mostraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ); sin embargo, el error total aumenta para  $\lambda \leq -0.4$  porque el observador sigue el error de ruido experimental. Por lo tanto, el valor óptimo de  $\lambda$  para la estimación se establece en -0.4.

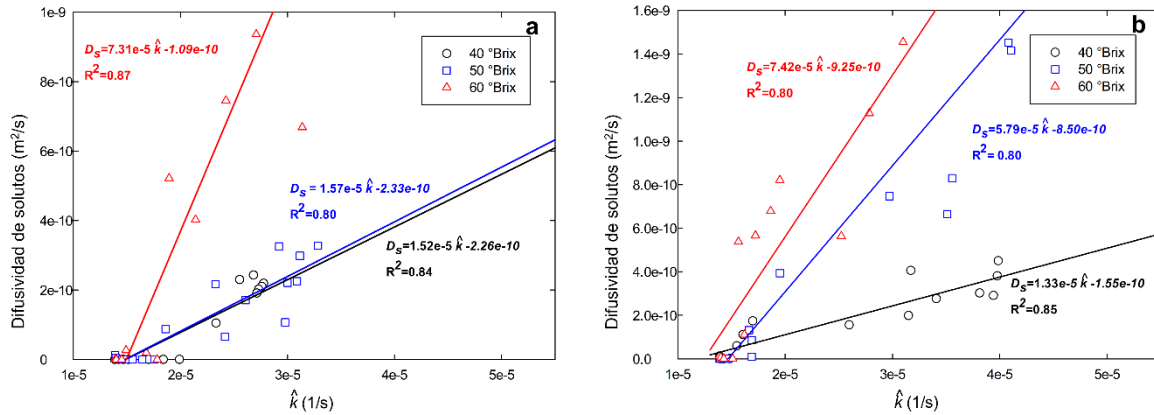
Se observó que el parámetro de transferencia de masa estimado  $\hat{k}$  depende del tiempo. El parámetro alcanza un valor máximo cuando la tasa de transferencia de masa comienza a disminuir al alcanzar un estado de transferencia de masa de equilibrio. La **Tabla 2.3.6** resume los valores de error y la media de la tasa constante específica de la

concentración total de sólidos solubles bajo esta consideración. A partir de los resultados, el parámetro  $\hat{k}$  alcanza un valor máximo ( $2.80 - 3.62 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$  y  $2.52 - 3.98 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$  para las soluciones de sacarosa y jugo concentrado de manzana, respectivamente) de solutos. Los parámetros de transferencia de masa estimados  $\hat{k}$  se vieron significativamente afectados ( $p < 0.05$ ) por la concentración ensayada y el tipo de solución utilizada; los parámetros  $\hat{k}$  aumentan cuando se utiliza el jugo concentrado de manzana como solución osmótica.

Cabe destacar que el comportamiento del parámetro de transferencia de masa  $\hat{k}$  presenta, como era de esperar, una tendencia similar a la observada para la difusividad durante todos los experimentos osmóticos. La **Figura 2.3.10** presenta el valor estimado de la tasa específica frente a la difusividad de los solutos durante la deshidratación osmótica de los cubos de manzana. Como se observa, existe una clara correlación lineal entre ellos, y todos los gráficos mostraron un nivel de correlación aceptable ( $R^2 > 0.80$ ). Esto sugiere que los valores de  $\hat{k}$  pueden ser utilizados para estimar la trayectoria dinámica de la difusividad del soluto.



**Figura 2.3.9** Trayectorias estado-error predichas por el observador de Luenberger para diferentes valores de  $\lambda$  y  $\phi = 9e6$  durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando 40 °Brix de jugo concentrado de manzana a 40 °C. a 40 °C. (a) Evolución de la concentración de sólidos solubles totales durante el tiempo de inmersión. (b) Comportamiento dinámico del parámetro específico de transferencia de solutos. (c) Optimización del valor propio.



**Figura 2.3.10** Constante específica de la concentración de sólidos solubles totales frente a la difusividad del soluto durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana utilizando a. soluciones de sacarosa y b. jugo concentrado de manzana a 40 °C.

**Tabla 2.3.6** Parámetros de ajuste y error del estimador basado en el observador de Luenberger para  $\lambda = -0.4$  durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana.

Solución osmótica	Promedio*	Error por	$\phi$ Error	Error	R <sup>2</sup>	RMSE	
Tipo	Concentración	$\hat{k} \times 10^5$ (1/s)	convergencia	por	total		
	(°Brix)			ruido**			
Sacarosa	40	2.55 (2.54 / 2.56) <sup>b, B</sup>	55.89	11.70	67.59	0.990	1.17
	50	2.71 (2.67 / 2.76) <sup>b, B</sup>	75.31	53.44	128.75	0.970	2.67
	60	3.62 (3.59 / 3.65) <sup>a, B</sup>	230.52	11.00	241.52	0.985	8.98
Jugo concentrado de manzana	40	3.52 (3.50 / 3.53) <sup>x, A</sup>	31.59	19.75	51.34	0.970	4.72
	50	4.23 (4.23 / 4.24) <sup>y, A</sup>	175.54	8.75	184.30	0.982	7.31
	60	4.41 (4.40 / 4.41) <sup>z, A</sup>	99.30	14.25	113.55	0.960	8.09

\*  $\int_0^t \hat{k} dt / \int_0^t dt$ . Los valores entre paréntesis indican el intervalo de confianza del 95 %. Las letras minúsculas iguales (a, b, c; o x, y, z) indican que no hay diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre las concentraciones para el mismo tipo de soluto. Las letras mayúsculas iguales (A, B) indican que no hay diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre el tipo de soluto para la misma concentración. \*\*  $\phi = 9 \times 10^6$

## 2.4 Conclusiones

Se presentaron diferentes enfoques para modelar las tasas de transferencia de masa durante la osmodeshidratación de cubos de manzana con soluciones de sacarosa y jugo concentrado de manzana. Los valores de equilibrio de las tasas de transferencia de masa estimados con el modelo de Azuara coincidieron con los determinados experimentalmente. Las difusividades estimadas se vieron significativamente afectadas ( $p < 0.05$ ) por la concentración y el tipo de solución, siendo mayores cuando se utilizó jugo concentrado de manzana como solución osmótica. Por lo tanto, el jugo concentrado de manzana favorece la deshidratación parcial del producto, ya que mayores difusividades se traducen en una cinética de transferencia de masa más rápida. Considerar el encogimiento del producto durante el proceso mejora el ajuste del modelo, en particular para los experimentos que requieren más tiempo para alcanzar el equilibrio (concentraciones de solución osmótica de 40 °Brix). Para el observador de Luenberger, el valor máximo de  $\hat{k}$  se obtiene cuando el sistema alcanza el equilibrio. Este último enfoque debe ser investigado más a fondo para estimar las propiedades dinámicas de este tipo de procesos, con el objetivo de simplificar el problema matemático para aplicaciones prácticas.

### *Agradecimientos*

El autor González-Pérez agradece el apoyo financiero para sus estudios de doctorado de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México. Los autores agradecen a *Ingredion* México S.A. de C.V. por la donación del jugo concentrado de manzana.

## Referencias

- Ae, L., Mg, G., Ti, L., & Es, L. (2016). Kinetic Study of the Osmotic Pretreatment and Quality Evaluation of Traditional Greek Candied Pumpkin. *Food & Nutrition Journal*, 1(1). doi: 10.29011/2575-7091.100005
- Aguirre-García, M., Hernández-Carranza, P., Cortés-Zavaleta, O., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-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, 1–10. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110003
- Aires, K. L. C. D. A., da Silva, W. P., de Farias Aires, J. E., da Silva Júnior, A. F., & Silva, C. M. D. P. D. S. E. (2018). Apple osmotic dehydration described by three-dimensional numerical solution of the diffusion equation. *Drying Technology*, 36(16), 1970–1981. doi: 10.1080/07373937.2018.1431274
- Alam, Md. S., Kaur, M., & Ramya, H. G. (2019). Mass transfer kinetics for osmotic dehydration of kinnow fruit in sugar solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89(1), 361–370. doi: 10.1007/s40011-017-0951-z
- Allahdad, Z., Nasiri, M., Varidi, M., & Varidi, M. J. (2019). Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 244, 202–211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T., & Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 286–300. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.12.007
- Ayala-Aponte, A. A., Molina-Cortés, A., & Serna-Cock, L. (2018). Osmotic dehydration of green mango samples (*Mangifera indica* L., *Filipino* Var.) in ternary solutions. *Vitae*, 25(1), 8–16. doi: 10.17533/udea.vitae.v25n1a02
- Azuara, E., Beristain, C., & García, H. S. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food Science and Technology*, 29(4), 239–242.

- Barbosa de Lima, A. G., da Silva, J. V., Pereira, E. M. A., dos Santos, I. B., & de Lima, W. M. P. B. (2016). Drying of bioproducts: Quality and energy aspects. En J. M. P. Q. Delgado & A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (Vol. 63, pp. 1–18). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-19767-8\_1
- Bera, D., & Roy, L. (2015). Osmotic dehydration of litchi using sucrose solution: Effect of mass transfer. *Journal of Food Processing & Technology*, 06(07). doi: 10.4172/2157-7110.1000462
- Bozkir, H., Rayman Ergün, A., Serdar, E., Metin, G., & Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 135–141. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
- Brochier, B., Marczak, L. D. F., & Noreña, C. P. Z. (2015). Osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes: Water effective diffusivity evaluation. *Food and Bioprocess Technology*, 8(3), 623–636. doi: 10.1007/s11947-014-1432-5
- Calín-Sánchez, Á., Kharaghani, A., Lech, K., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Tsotsas, E. (2015). Drying Kinetics and Microstructural and Sensory Properties of Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as Affected by Drying Method. *Food and Bioprocess Technology*, 8(1), 63–74. doi: 10.1007/s11947-014-1383-x
- Cano-Lamadrid, M., Lech, K., Michalska, A., Wasilewska, M., Figiel, A., Wojdyło, A., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar Mollar de Elche. *Food Chemistry*, 232, 306–315. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.033
- Chitrakar, B., Zhang, M., & Adhikari, B. (2019). Dehydrated foods: Are they microbiologically safe? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2734–2745. doi: 10.1080/10408398.2018.1466265
- 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

- Cortez-Latorre, J. D., Faicán, M., Pirovani, M., & Piagentini, A. (2021). Improving fresh-cut apple quality and healthy potential-related attributes through mild vacuum impregnation process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(12), e15995. doi: 10.1111/jfpp.15995
- de Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., de Mendonça, K. S., Resende, N. S., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2017). Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 10–18. doi: 10.1016/j.ifset.2017.01.006
- de Mello Jr RE, Corrêa JLG, Lopes FJ, de Souza AU, da Silva KCR (2019) Kinetics of the pulsed vacuum osmotic dehydration of green fig (*Ficus carica* L.). *Heat Mass Transf* 55(6):1685–1691. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02559-w>
- Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., ... Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(9), 1408–1432. doi: 10.1080/10408398.2017.1409192
- Dermesonlouoglou, E. K., Bimpilas, A., Andreou, V., Katsaros, G. J., Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2017). Process optimization and kinetic modeling of quality of fresh-cut strawberry cubes pretreated by high pressure and osmosis: High pressure and osmotic treatment of strawberries for shelf life extension. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), 1–14. doi: 10.1111/jfpp.13137
- Dermesonlouoglou, E. K., & Giannakourou, M. C. (2019). Evaluation and modelling of osmotic pre-treatment of peach using alternative agents in a multiple-component solution: Modelling osmotic pre-treatment of peach. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1240–1249. doi: 10.1002/jsfa.9296
- Derrickson-Tharrington, E., Kendall, P. A., & Sofos, J. N. (2005). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 during storage or drying of apple slices pretreated with acidic solutions. *International Journal of Food Microbiology*, 99(1), 79–89. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.07.015
- Dias da Silva, G., Barros, Z. M. P., de Medeiros, R. A. B., de Carvalho, C. B. O., Rupert Brandão, S. C., & Azoubel, P. M. (2016). Pretreatments for melon drying

- implementing ultrasound and vacuum. *LWT*, 74, 114–119. doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.039
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L., & Xidieh Murr, F. E. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya L.*). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 267–274. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.016
- Faicán, M. A., Piagentini, A., Pirovani, M. É., Faicán, M. A., Piagentini, A., & Pirovani, M. É. (2022). Vacuum impregnation of fresh-cut apples with osmotic solutions containing honey. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 75(3), 10089–10100. doi: 10.15446/rfnam.v75n3.99558
- Fernando, W. J. N., Ahmad, A. L., Shukor, S. R. A., & Lok, Y. H. (2008). A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *Journal of Food Engineering*, 88(2), 229–238. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.02.008
- García-Noguera, J., Oliveira, F. I. P., Weller, C. L., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2014). Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of freeze dried strawberries. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2222–2227. doi: 10.1007/s13197-012-0724-x
- Georgiadis, G. P., Mariño Pampín, B., Adrián Cabo, D., & Georgiadis, M. C. (2020). Optimal production scheduling of food process industries. *Computers & Chemical Engineering*, 134, 106682. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106682
- González-Pérez, J.E., & López-Malo, A. (2022). Sensory evaluation of apple cubes (Granny Smith var.) impregnated with concentrated grape juice (Victoria var.) subjected to convection drying. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 9(54), 28–39.
- González-Pérez, J.E., López-Méndez, E. M., Luna-Guevara, J. J., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-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
- González-Pérez, J.E., López-Méndez, E. M., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-López, I. I. (2019). Mass transfer and morphometric characteristics of fresh and



- osmodehydrated white mushroom pilei during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 262, 181–188. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.06.017
- González-Pérez, J.E., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2021). Mass transfer during osmotic dehydration of fruits and vegetables: Process factors and non-thermal methods. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 344–374. doi: 10.1007/s12393-020-09276-3
- González-Pérez, Julio E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Guerrero-Beltrán, J. A., & López-Malo, A. (2022). Vacuum impregnation on apples with grape juice concentrate: Effects of pressure, processing time, and juice concentration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102981. doi: 10.1016/j.ifset.2022.102981
- Guerra-Valle, M. E., Moreno, J., Lillo-Pérez, S., Petzold, G., Simpson, R., & Nuñez, H. (2018). Enrichment of apple slices with bioactive compounds from pomegranate cryoconcentrated juice as an osmodehydration agent. *Journal of Food Quality*, 2018, 1–9. doi: 10.1155/2018/7241981
- Gulati, T., & Datta, A. K. (2015). Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, 166, 119–138. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031
- Hamed, F., Mohebbi, M., Shahidi, F., & Azarpazhooh, E. (2018). Ultrasound-assisted osmotic treatment of model food impregnated with pomegranate peel phenolic compounds: Mass transfer, texture, and phenolic evaluations. *Food and Bioprocess Technology*, 11(5), 1061–1074. doi: 10.1007/s11947-018-2071-z
- Hirsch, M. W., Smale, S., Devaney, R. L., & Hirsch, M. W. (2004). *Differential equations, dynamical systems, and an introduction to chaos* (2nd ed). San Diego, CA: Academic Press.
- Jiang, L., & Liu, N. (2022). Correcting noisy dynamic mode decomposition with Kalman filters. *Journal of Computational Physics*, 111175. doi: 10.1016/j.jcp.2022.111175
- Katsoufi, S., Lazou, A. E., Giannakourou, M. C., & Krokida, M. K. (2017). Mass transfer kinetics and quality attributes of osmo-dehydrated candied pumpkins using nutritious sweeteners. *Journal of Food Science and Technology*, 54(10), 3338–3348. doi: 10.1007/s13197-017-2786-2

- Kek, S. P., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2013). Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 495–506. doi: 10.1016/j.fbp.2013.05.003
- Khoualdia, B., Ben-Ali, S., & Hannachi, A. (2020). Pomegranate arils osmotic dehydration: Effect of pre-drying on mass transfer. *Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 2129–2138. doi: 10.1007/s13197-020-04248-1
- Khubber, S., Chaturvedi, K., Taghi Gharibzahedi, S. M., Cruz, R. M. S., Lorenzo, J. M., Gehlot, R., & Barba, F. J. (2020). Non-conventional osmotic solutes (honey and glycerol) improve mass transfer and extend shelf life of hot-air dried red carrots: Kinetics, quality, bioactivity, microstructure, and storage stability. *LWT*, 131, 109764. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109764
- Kowalska, H., Marzec, A., Kowalska, J., Ciużyńska, A., Czajkowska, K., Cichowska, J., ... Lenart, A. (2017). Osmotic dehydration of Honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 500–505. doi: 10.1016/j.lwt.2017.03.044
- Kowalska, J., Kowalska, H., Marzec, A., Brzeziński, T., Samborska, K., & Lenart, A. (2018). Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 799–807. doi: 10.1007/s10068-018-0304-6
- Lech, K., Figiel, A., Michalska, A., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2018). The effect of selected fruit juice concentrates used as osmotic agents on the drying kinetics and chemical properties of vacuum-microwave drying of pumpkin. *Journal of Food Quality*, 2018, 1–11. doi: 10.1155/2018/7293932
- Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M., & Szarycz, M. (2015). Drying Kinetics and Bioactivity of Beetroot Slices Pretreated in Concentrated Chokeberry Juice and Dried with Vacuum Microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644–1653. doi: 10.1080/07373937.2015.1075209
- Li, J., Zhang, C., Liu, H., Liu, J., & Jiao, Z. (2020). Profiles of Sugar and Organic Acid of Fruit Juices: A Comparative Study and Implication for Authentication. *Journal of Food Quality*, 2020, 1–11. doi: 10.1155/2020/7236534
- Luchese, C. L., Gurak, P. D., & Marczak, L. D. F. (2015). Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): Evaluation of water loss and sucrose incorporation and the

- quantification of carotenoids. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 1128–1136. doi: 10.1016/j.lwt.2015.04.060
- Luo, W., Tappi, S., Wang, C., Yu, Y., Zhu, S., & Rocculi, P. (2018). Study of the effect of High Hydrostatic Pressure (HHP) on the osmotic dehydration mechanism and kinetics of wumei fruit (*Prunus mume*). *Food and Bioprocess Technology*, 11(11), 2044–2054. doi: 10.1007/s11947-018-2165-7
- Martínez-Vera, C., López-Serrano, F., Vizcarra-Mendoza, M., & Álvarez-Calderón, J. (2009). Assessment of the diffusion model for drying using a state-observer based process. *Biosystems Engineering*, 102(4), 406–416. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.01.009
- Martínez-Vera, C., Ruiz-Martínez, R. S., Vizcarra-Mendoza, M. G., & Álvarez-Calderón, J. (2010). Apparent diffusion model assessment in extraction processes by means of a Luenberger observer. *Journal of Food Engineering*, 101(1), 16–22. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.06.003
- Martínez-Vera, C., Schaum, A., Calderón, J. A., & Vizcarra-Mendoza, M. G. (2013). An observer based methodology for estimating concentration-dependent diffusion coefficients in drying considering shrinkage. *International Journal of Food Engineering*, 9(1), 121–128. doi: 10.1515/ijfe-2012-0187
- Martínez-Vera, C., & Vizcarra-Mendoza, M. G. (2022). Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach. *Biosystems Engineering*, 218, 256–273. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.04.016
- Mayor, L., Moreira, R., & Sereno, A. M. (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 103(1), 29–37. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.08.031
- Mokhtarian, M., Heydari Majd, M., Koushki, F., Bakhshabadi, H., Daraei Garmakhany, A., & Rashidzadeh, S. (2014). Optimization of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 6(2), 201–214. doi: 10.3920/QAS2012.0121

- Moon, K. M., Kwon, E.-B., Lee, B., & Kim, C. Y. (2020). Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products. *Molecules*, 25(12), 2754. doi: 10.3390/molecules25122754
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E., & Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation properties of some fruits at vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*, 56(4), 307–314. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00155-3
- Muñiz-Becerá, S., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2017). Solute transfer in osmotic dehydration of vegetable foods: A review: solute transfer in osmotic dehydration. *Journal of Food Science*, 82(10), 2251–2259. doi: 10.1111/1750-3841.13857
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Tappi, S., Siroli, L., Lanciotti, R., Romani, S., & Witrowa-Rajchert, D. (2018). Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): Study on quality parameters evolution during storage. *Food Control*, 93, 40–47. doi: 10.1016/j.foodcont.2018.05.005
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K., & Figiel, A. (2015a). Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried sour cherry fruits pre-dehydrated in fruit concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 8(10), 2076–2095. doi: 10.1007/s11947-015-1561-5
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K., & Figiel, A. (2015b). Influence of osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 824–836. doi: 10.1007/s11947-014-1447-y
- Ortega, R., Bobtsov, A., Dochain, D., & Nikolaev, N. (2019). State observers for reaction systems with improved convergence rates. *Journal of Process Control*, 83, 53–62. Scopus. doi: 10.1016/j.jprocont.2019.08.003
- Osae, R., Zhou, C., Xu, B., Tchabo, W., Tahir, H. E., Mustapha, A. T., & Ma, H. (2019). Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices. *Journal of Food Biochemistry*, 43(5), 1–14. doi: 10.1111/jfbc.12832

- Pacheco-Angulo, H., Herman-Lara, E., García-Alvarado, M. A., & Ruiz-López, I. I. (2016). Mass transfer modeling in osmotic dehydration: Equilibrium characteristics and process dynamics under variable solution concentration and convective boundary. *Food and Bioprocesses Processing*, 97, 88–99. doi: 10.1016/j.fbp.2015.11.002
- Paes, M. S., Del Pintor, J. P. F., Pessoa Filho, P. de A., & Tadini, C. C. (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. doi: 10.1016/j.molliq.2018.10.040
- Pei, F., Xiao, K., Chen, L., Yang, W., Zhao, L., Fang, Y., ... Hu, Q. (2019). Mass transfer characteristics during ultrasound-assisted osmotic dehydration of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2213–2223. doi: 10.1007/s13197-019-03707-8
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216–1217. doi: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x
- Peng, J., Bi, J., Yi, J., Allaf, K., Besombes, C., Jin, X., Asghar Ali, M. N. H. (2019). Apple juice concentrate impregnation enhances nutritional and textural attributes of the instant controlled pressure drop (DIC)-dried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, jsfa.9898. doi: 10.1002/jsfa.9898
- Pinheiro, R. M. M., da Silva, W. P., do Amaral Miranda, D. S., eSilva, C. M. D. P. S., & Pessoa, T. (2021). Osmotic dehydration of cubic pieces of melon: Description through a three-dimensional diffusion model considering the resistance to mass flows on the surface. *Heat and Mass Transfer*, 57(3), 405–415. doi: 10.1007/s00231-020-02928-4
- Prithani, R., & Dash, K. K. (2020). Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 1–11. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102407
- Qiu, L., Zhang, M., Tang, J., Adhikari, 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

- Rahman, M. S. (2017). State diagram of foods and Its importance to food stability during storage and processing. En J. Ahmed (Ed.), *Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials* (pp. 251–260). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9781118935682.ch11
- Rahman M, S. M. A. (2015). Osmotic dehydration of pumpkin using response surface methodology -influences of operating conditions on water loss and solute gain. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 05(05). doi: 10.4172/2155-9821.1000226
- Rongtong, B., Suwonsichon, T., Ritthiruangdej, P., & Kasemsumran, S. (2018). Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. *Agriculture and Natural Resources*, 52(6), 557–564. doi: 10.1016/j.anres.2018.11.023
- Ruiz-López, I. I., Ruiz-Espinosa, H., Arellanes-Lozada, P., Bárcenas-Pozos, M. E., & García-Alvarado, M. A. (2012). Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 427–435. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.08.025
- Samborska, K., Eliasson, L., Marzec, A., Kowalska, J., Piotrowski, D., Lenart, A., & Kowalska, H. (2019). The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extract to sugar solution on osmotic dehydration and sensory properties of apples. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1927–1938. doi: 10.1007/s13197-019-03658-0
- Sangeeta, & Hathan, B. S. (2016). Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam (*Amorphophallus* spp.) during osmotic dehydration in sodium chloride solution: Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3), 521–530. doi: 10.1111/jfpp.12631
- Sethi, K., & Kaur, M. (2019). Effect of osmotic dehydration on physicochemical properties of pineapple using honey, sucrose and honey-sucrose solutions. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 6257–6262. doi: 10.35940/ijeat.A2026.109119

- Shamaei, S., Emam-Djomeh, Z., & Moini, S. (2012). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: Effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties: ultrasound-osmotic dehydration of cranberry. *Journal of Texture Studies*, 43(2), 133–141. doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x
- Sucheta, Chaturvedi, K., & Yadav, S. K. (2019). Ultrasonication assisted salt-spices impregnation in black carrots to attain anthocyanins stability, quality retention and antimicrobial efficacy on hot-air convective drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104661. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104661
- Tirouchelvame, D., Sivakumar, V., & Maran, P. (2015). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of amla (*Emblica officinalis* L.) cubes in sugar solution. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(4), 547–559. doi: 10.2298/CICEQ140712011T
- Yilmaz, F. M., & Ersus Bilek, S. (2018). Ultrasound-assisted vacuum impregnation on the fortification of fresh-cut apple with calcium and black carrot phenolics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 509–516. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.07.007
- Zecchi B, Gerla P (2020) Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. *J Food Eng* 274:1–8. doi:10.1016/j.jfoodeng.2019.109821
- Zhao, Y., & Xie, J. (2004). Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(9), 434–451. doi: 10.1016/j.tifs.2004.01.008
- Zou, K., Teng, J., Huang, L., Dai, X., & Wei, B. (2013). Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. *LWT - Food Science and Technology*, 51(1), 253–259. doi: 10.1016/j.lwt.2012.11.005

## CAPÍTULO 3

### **Impregnación al vacío de manzanas con jugo concentrado de uva: Efectos de la presión, tiempo de proceso y concentración del jugo**

Julio E. González-Pérez; Oscar Jiménez-González; Nelly Ramírez-Corona; José A. Guerrero-Beltrán; Aurelio López-Malo

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

#### ***Resumen***

Los cubos de manzana se sometieron a impregnación al vacío con jugo concentrado de uva. El efecto de la reducción de la presión ( $VP = 100 - 500$  mmHg), el tiempo de inmersión ( $t = 10-30$  min) y la concentración de jugo de uva ( $C = 40 - 60$  °Brix) sobre los parámetros de impregnación se evaluaron utilizando una metodología de superficie de respuesta. Se desarrollaron ecuaciones polinómicas de segundo orden ( $R^2 > 0.895$ ) para describir el comportamiento de la pérdida de agua, sólidos solubles totales,  $L^*$ ,  $a^*$ , °Hue (matiz), diferencia neta de color, el color del área impregnada / área total ( $A_U / A_{OP}$ ), la actividad antioxidante, las antocianinas monoméricas totales, y el volumen adimensional ( $V / V_o$ ) en el producto impregnado. El VP tuvo un efecto significativo ( $p \leq 0.05$ ) sobre los parámetros de transferencia de masa, los parámetros de color, la  $A_U/A_{OP}$  y los compuestos bioactivos. Sin embargo, a 60 °Brix y 500 mmHg, se alcanzaron los valores más bajos de  $V/V_o$  debido a la disrupción celular. Por lo tanto, se recomienda utilizar un  $V / V_o = 500$  mmHg y un  $t$  inferior a 20 min para impregnar significativamente los compuestos y obtener un producto sin una modificación morfométrica considerable.

***Palabras clave:*** Antioxidantes, compuestos bioactivos, diseño Box-Behnken, procesamiento de imagen, tinción de tejido.



### 3.1 Introducción

El consumo de jugo concentrado de uva ha demostrado efectos positivos para la salud debido a algunos componentes (Salehi, 2020). Un ejemplo de estos son antioxidantes y compuestos fenólicos que han demostrado una disminución del riesgo de enfermedades cardiovasculares (hipertensión e hipercolesterolemia) e infertilidad masculina (Dohadwala y Vita, 2009; Lamas *et al.*, 2015). Además, el alto contenido de glucosa ( $> 50$  g / 100 g) y fructosa ( $> 41$  g / 100 g) es una de las razones por las que estos jugos se han utilizado como sustituto de las soluciones de sacarosa (Chambi *et al.*, 2016; Trad *et al.*, 2021).

La impregnación de solutos es un proceso típico utilizado para aumentar la composición de un determinado compuesto o mezcla de componentes en una matriz alimentaria para desarrollar un alimento funcional (Bellary y Rastogi, 2016; Mújica-Paz *et al.*, 2003a). Los concentrados de jugos naturales de frutas y hortalizas han sido impregnados a trozos de frutas para aportar compuestos bioactivos y generar productos con alto valor nutricional de calidad (Lech *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2019). Además, algunos autores han utilizado el procedimiento de impregnación para incorporar compuestos bioactivos en productos alimenticios para modificar su color. Por ejemplo, se han incorporado antocianinas del fruto de kokum (*Garcinia indica*) (Adsare *et al.*, 2016), de mora (*Rubus fruticosus* L.) (Grajales-Lagunes *et al.*, 2019), o de zanahoria negra (*Daucus carota*) (Yilmaz y Ersus Bilek, 2018).

Una de las principales limitaciones del uso de la impregnación de alimentos como pretratamiento antes del secado (mediante procesos térmicos) es el tiempo requerido ( $> 12$  h) para reducir la actividad de agua del producto (Assis *et al.*, 2017); además, el proceso de transferencia de masa no ocurre de forma homogénea en todo el producto. Algunos autores han reportado una mayor concentración de la solución osmótica en la parte externa del producto y un mayor contenido de humedad en la parte interna al aplicar el procedimiento osmótico (Sette *et al.*, 2017). Algunas limitaciones de tener un alto contenido de solutos en la parte externa del producto podrían causar una resistencia a la transferencia de masa reflejando una menor tasa a través de la impregnación (González-Pérez *et al.*, 2021). Además, los solutos en la superficie del producto pueden cristalizar o caramelizarse cuando

el producto se expone a tratamientos térmicos para la reducción de la humedad (González-Pérez *et al.*, 2019; Sette *et al.*, 2017).

La impregnación de solutos en condiciones de vacío es una alternativa para homogeneizar los solutos en la matriz alimentaria. Con la aplicación de vacío, se elimina el gas o el líquido contenido en los poros del producto. Cuando se restablece la presión atmosférica, la solución externa penetra en el espacio de los poros de la matriz alimentaria, lo que refleja un aumento de la interfaz sólido-líquido y, en consecuencia, un aumento de la transferencia de masa (González-Pérez *et al.*, 2021). Los jugos de frutas y los jarabes de azúcar se han impregnado en condiciones de vacío en las frutas para obtener productos frutales de alto valor añadido. Este proceso se ha utilizado para incorporar compuestos fenólicos y flavonoides con el fin de aumentar los antioxidantes de soluciones de concentrado de zanahoria negra en manzana (Yılmaz y Ersus Bilek, 2017), flavonoides de jugo de mandarina en manzana (Betoret *et al.*, 2012), o impregnación de compuestos fenólicos de residuos de uva (var. *Isabel*) en mango (var. *Tommy Atkins*) (Batista de Medeiros *et al.*, 2019).

Algunos autores han recomendado la aplicación del procedimiento de impregnación utilizando diferentes niveles de presión (vacío), tiempo de inmersión y diferentes cantidades de algunos compuestos en la solución para obtener un producto con actividad de agua, solutos y color específicos, entre otras características (Escobedo-Avellaneda *et al.*, 2018; Mújica-Paz *et al.*, 2003b; Yılmaz y Ersus Bilek, 2017). El modelado de las características intrínsecas de los alimentos expuestos a la impregnación al vacío y otras condiciones se ha desarrollado utilizando la metodología de superficie de respuesta (*RSM*). La *RSM* se ha utilizado para optimizar la incorporación del glucósido t-resveratrol del jugo de uva (15 °Brix) en rodajas de manzana (var. *Empire*), variando los niveles de reducción de presión, el tiempo de inmersión y el tiempo de relajación (Joshi y Rupasinghe, 2010). Esta metodología ayudó a determinar el efecto de la temperatura, la concentración de sacarosa y la reducción de presión sobre la pérdida de agua, la ganancia de sólidos, el color y el contenido de antocianinas en la impregnación al vacío de soluciones de jugo de mora en rodajas de ñame (*Pachyrhizus erosus*) (Grajales-Lagunes *et al.*, 2019). La impregnación al vacío puede introducir compuestos que enriquezcan las frutas frescas con sustancias

nutricionales y / o funcionales, obteniendo así formulaciones alimentarias innovadoras (Andrés *et al.*, 2019). La aplicación de la impregnación al vacío puede ser controlada y optimizada variando las condiciones de operación. Sin embargo, se debe requerir una tasa de transferencia de masa óptima de las soluciones osmóticas para asegurar que suficientes solutos lleguen a los productos sin un impacto negativo en otros atributos, principalmente cuando la impregnación se utiliza para desarrollar productos frutales formulados con cierta composición (Escobedo-Avellaneda *et al.*, 2018; González-Pérez *et al.*, 2021).

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la reducción de presión, el tiempo de proceso y la concentración del jugo de uva en la calidad de la impregnación de manzanas utilizando la metodología de superficie de respuesta. Las respuestas evaluadas fueron los parámetros de transferencia de masa (pérdida de agua y ganancia de solutos), la actividad del agua, los sólidos solubles totales (*SST*), la actividad antioxidante (*AA*), los compuestos fenólicos totales (*TPC*), antocianinas monoméricas totales (*Mlv*), los parámetros de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , el ángulo de matiz ( $^{\circ}Hue$ ), el croma ( $C^*$ ) y  $\Delta E$ ), la impregnación del color y la contracción.

## 3.2 Materiales y métodos

### 3.2.1 Materiales

Manzanas frescas (*Malus domestica* L.) var. *Granny Smith* ( $a_w = 0.987 \pm 0.001$ ;  $13.1 \pm 0.3$  °Brix y  $pH = 4.00 \pm 0.02$ ) fueron adquiridas en un mercado local (San Andrés Cholula, Puebla, México) y almacenadas a 4 °C hasta su uso. Las manzanas se lavaron, se higienizaron durante 10 min con una solución de ácido peracético (100  $\mu L / L$ ), se pelaron y se cortaron en cubos (12 mm  $\times$  12 mm  $\times$  12 mm) con una cortadora industrial de vegetales. El concentrado de jugo de uva (*Vitis vinifera*, var. *Victoria*) se obtuvo del viñedo Casa Leal (Aguascalientes, México). El concentrado de jugo de uva ( $69.1 \pm 1.0$  °Brix) se diluyó a 40, 50 y 60 °Brix con agua destilada.

### 3.2.2 Análisis fisicoquímico

El contenido de humedad ( $Y$ ) se determinó según el método 950.466 de AOAC International (1995), considerando las Ecuaciones (1) y (2) para estimar la fracción de humedad con base húmeda y seca, respectivamente. Además, se midieron los sólidos solubles totales ( $SST$ , °Brix) utilizando un refractómetro digital (Atago Co., Pocket PAL-RI, Tokio, Japón) (Rongtong *et al.*, 2018), y la actividad del agua ( $a_w$ ) se determinó a  $25.0 \pm 0.5$  °C utilizando un higrómetro (AquaLab, 4TEV, EE. UU.) (López-Malo *et al.*, 1993).

$$Y_k = \frac{g \text{ agua}}{g \text{ muestra fresca}} = b.h., k = 0 \text{ o } OD \quad (1)$$

$$\frac{b.h.}{1-b.h.} = b.s. \quad (2)$$

donde  $Y$  es la fracción de la humedad de la muestra analizada. La  $k$  corresponde al tipo de muestra analizada, cuando el valor de  $k = 0$ , se refiere a la muestra fresca y cuando  $k = OD$  se refiere la muestra sometida a osmodeshidratación. La Ecuación 1 permite reportar la  $Y_k$  en base húmeda ( $b.h.$ ) y la Ecuación 2 permite reportarla en base seca ( $b.s.$ )

### 3.2.3 Tratamiento de impregnación-deshidratación

La impregnación al vacío de los cubos de manzana se realizó en un desecador a 40 °C. El procedimiento consistió en sumergir los cubos de manzana en las soluciones osmóticas de diferentes concentraciones (40, 50 y 60 °Brix), considerando una relación 1 / 10 (p / p) fruta / solución osmótica. El desecador se sumergió en un baño calefactor (Büchi, B-300 Base, Flawil, Suiza). Una manguera, conectada al desecador, se conectó a una bomba de vacío (Büchi, V-300, Flawil, Suiza), y la presión del sistema se redujo de 598 mmHg (presión atmosférica en San Andrés Cholula, Puebla, México) a 98, 298 y 498 mmHg, durante diferentes tiempos de inmersión (10, 20 y 30 min) seguidos de un periodo de relajación (5 min) a presión atmosférica (Mújica-Paz, Valdez-Fragoso, López-Malo, Palou y Welti-Chanes, 2003; Zapata, Ciro, y Marulanda, 2016). Para el análisis estadístico de los resultados, se tomaron reducciones de presión en valores de 100, 300 y 500 mmHg (presión

manométrica). Después de la impregnación, los cubos de manzana fueron retirados de la solución osmótica. La solución adherida a la superficie del cubo se eliminó utilizando papel absorbente. Las muestras procesadas se pesaron y mezclaron para las diferentes determinaciones, que se realizaron por triplicado.

### 3.2.4 Determinación de las propiedades de transferencia de masa

Los parámetros de transferencia de masa; pérdida de agua ( $WL$ ) y ganancia de soluto ( $SG$ ) se calcularon con las Ecuaciones (3)-(4), respectivamente, (González-Pérez *et al.*, 2021; Mújica-Paz *et al.*, 2003b).

$$WL = \frac{m_{p0}Y_0 - m_{DO}Y_{DO}}{m_{p0}} \quad (3)$$

$$SG = \frac{m_{DO}(1-Y_{DO}) - m_{p0}(1-Y_0)}{m_{p0}} \quad (4)$$

donde  $WL$  = pérdida de agua (g de agua / g de producto fresco),  $SG$  = ganancia de solutos (g de solutos / g de producto fresco),  $m_{p0}$  = peso del producto fresco (g),  $m_{DO}$  = peso del producto impregnado (g),  $Y_0$  e  $Y_{DO}$  son la fracción de humedad (base húmeda) de los productos frescos e impregnados, respectivamente.

### 3.2.5 Análisis de imágenes

El análisis de la tinción del tejido de la manzana debido al procedimiento de impregnación se realizó mediante el procesamiento de imágenes. Los análisis de imágenes se realizaron con un ImageJ® (ver. 1.49h, Dresden, Alemania). Estos se utilizaron para describir el área de distribución del color del soluto impregnado, la contracción y la deformación de los cubos de manzana. De la parte central de cada muestra se cortó una rodaja de 1 mm de grosor con una cuchilla afilada.

Se adquirieron imágenes digitales de las rebanadas de la muestra, un objeto de referencia de dimensiones conocidas y un fondo azul con estandarización de color (Ortiz-

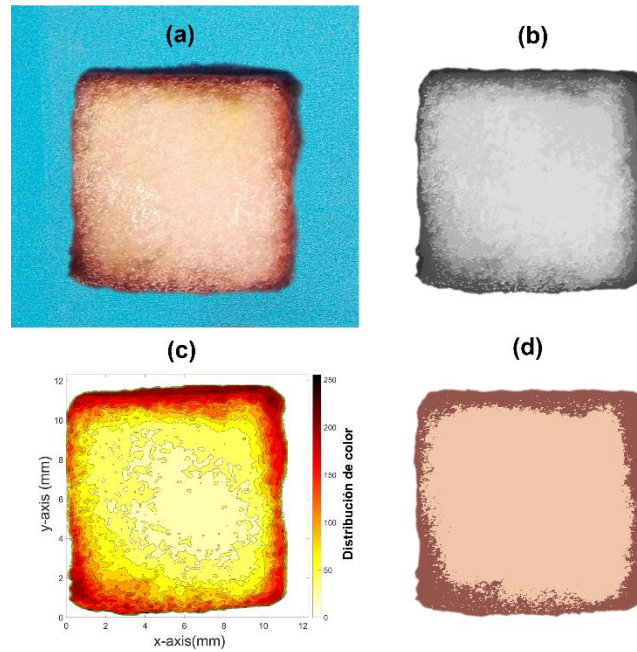
García-Carrasco *et al.*, 2015). Las imágenes se tomaron con una cámara de  $4608 \times 3456$  píxeles (Coolpix L810, Nikon Corp, Japón), y el sistema se configuró con un 60 % de brillo en caliente (3200K) mediante un estudio fotográfico portátil (GLURIZ 64Leds, Hong Kong, China). Las imágenes digitales se utilizaron para describir las áreas de distribución del color del soluto impregnado, la contracción y la deformación de los cubos de manzana. Brevemente, se eliminó el fondo de la imagen original (**Figura 3.2.1a**), se redujo la imagen a formato de escala de grises (con intensidad de píxeles entre 0: negro y 255: blanco) (**Figura 3.2.1b**), y se obtuvo un perfil bidimensional de intensidad de píxeles con la diferencia de intensidad de 255 píxeles (0: blanco y 255: negro, **Figura 3.2.1c**) (Peters, 2017). Se realizó una reducción de color a dos grupos (**Figura 3.2.1d**) considerando los valores del perfil 2-D de intensidad de píxel entre 80 y 255 como el color del soluto impregnado y los valores de intensidad por debajo de 80 como el color de la muestra fresca. El análisis de la imagen se realizó para cada tratamiento utilizando cuatro cubos. El área de distribución del color del soluto impregnado y la contracción de los cubos de manzana se estimaron con las Ecuaciones (5) y (6), respectivamente (González-Pérez *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018). El área de distribución del color del soluto impregnado ( $A_U / A_{OP}$ ) en la tinción del tejido de la manzana se define como el área de la sección transversal del soluto impregnado en el producto ( $A_U$ ) dividida por el área de la sección transversal del producto tratado ( $A_{OP}$ ):

$$\frac{A_U}{A_{OP}} = \frac{A_U}{A_U + A_M} \quad (5)$$

donde  $A_M$  = área de la sección transversal del soluto no impregnado en el producto. La contracción del producto se analizó utilizando el volumen adimensional ( $V/V_0$ ) (Zhang *et al.*, 2018):

$$\frac{V}{V_0} = \frac{(A_{OP})^{3/2}}{(A_{M,0})^{3/2}} \quad (6)$$

donde  $A_{M,0}$  = área de la sección transversal del producto fresco (González-Pérez *et al.*, 2019).



**Figura 3.2.1** Pasos de procesamiento de imágenes para obtener el área de distribución de color del soluto impregnado: **(a)** imagen original, **(b)** imagen en escala de grises sin fondo, **(c)** perfil bidimensional de intensidad de píxeles de la imagen perfil bidimensional de intensidad **(d)** reducción del color a dos clústeres.

### 3.2.6 Características de color

Los parámetros de color ( $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ) de la muestra de manzana impregnada se midieron con un colorímetro (Konica Minolta CR-400, Osaka, Japón) en modo de reflexión en la escala CIELab\*. Los parámetros de color se utilizaron para calcular la diferencia total de color ( $\Delta E$ ), el croma ( $C^*$ ) y el ángulo de matiz ( $^{\circ}Hue$ ) utilizando las Ecuaciones (7), (8) y (9), respectivamente (Xiao *et al.*, 2019).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (7)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (8)$$

$$\text{Hue}(\text{°}) = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (9)$$

Donde  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son los valores de la muestra.  $L_0^* = 75.43 \pm 3.26$ ,  $a_0^* = -4.55 \pm 2.19$ , y  $b_0^* = 14.55 \pm 0.00$  son los parámetros de color de la manzana fresca.

### 3.2.7 Compuestos bioactivos

#### 3.2.7.1 Extracción de las muestras

Los extractos de las muestras impregnadas se obtuvieron mediante maceración según Blackhall *et al.* (2018) con algunas modificaciones. Brevemente, se trituraron  $2.50 \pm 0.18$  g de muestras impregnadas y se homogeneizaron en un mortero con 5 mL de solución de etanol al 0.1 % de HCl (99.5 %). A continuación, se añadió más solución de etanol acidificado al extracto para hacer un volumen total de 20 mL, que se maceró en la oscuridad durante 12 h. Después, los extractos se centrifugaron a  $12000 \times g$  a  $10 \text{ °C}$  durante 10 min y se filtraron a través del papel de filtro Whatman No. 4.

#### 3.2.7.2 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante (AA) se determinó evaluando el efecto de la inhibición de radicales libres sobre el DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazilo) (Brand-Williams *et al.*, 1995). Se mezcló una alícuota de 100  $\mu\text{L}$  del extracto con 100  $\mu\text{L}$  de etanol (99.5 %) y 2000  $\mu\text{L}$  de solución etanólica de DPPH 0.1 mM. La mezcla se homogeneizó con un vórtex y se dejó en la oscuridad durante 30 min a temperatura ambiente ( $25 \pm 1 \text{ °C}$ ). La absorbancia se leyó a 517 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (Shimadzu, UV-1900i, Tokio, Japón). El porcentaje de inhibición del radical DPPH ( $I\%$ ) se calculó mediante la Ecuación (10).

$$I\% = \frac{\text{Abs}_{\text{DPPH}} - \text{Abs}_S}{\text{Abs}_{\text{DPPH}}} \times 100 \quad (10)$$

Donde  $\text{Abs}_{\text{DPPH}}$  = del control (sin muestra), y  $\text{Abs}_S$  = absorbancia de la muestra. Se obtuvo una curva estándar ( $I\% = m[\text{Trolox}] + b$ ;  $R^2 = 0.99$ ) utilizando diferentes



concentraciones (0 - 100 mg / L) de Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8 tetrametilcromo-2 carboxílico 97 %). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de Trolox (*TE*) / 100 g de producto (b.s.) utilizando la Ecuación (11).

$$TE \left( \frac{mg}{100 \text{ g producto (b.s.)}} \right) = \left( \frac{I\% - b}{m} \right) \times DF \times 100 \quad (11)$$

Donde *I%* = porcentaje de inhibición, *b* = intercepción (1.107), *m* = pendiente (0.781), y *DF* = factor de dilución de la muestra.

### 3.2.7.3 Compuestos fenólicos totales

Los compuestos fenólicos totales (*TPC*) se estimaron utilizando el método espectrofotométrico de fenol *Folin-Ciocalteu* según Singleton Orthofer, y Lamuela-Raventos (1999). Se mezcló una alícuota de 100  $\mu\text{L}$  del extracto con 100  $\mu\text{L}$  de agua destilada y 1000  $\mu\text{L}$  de solución de Folin-Ciocalteu (0.1 M). La mezcla se incubó durante 3 min en la oscuridad a temperatura ambiente. A continuación, se añadieron 1000  $\mu\text{L}$  de solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  2 M a la mezcla y se incubaron a temperatura ambiente en la oscuridad durante 30 min. La absorbancia se registró a 765 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (Shimadzu, UV-1900i, Tokio, Japón). Se realizó una curva estándar ( $R^2 = 0.990$ ) con diferentes concentraciones (0 - 50 mg / L) de ácido gálico. Los compuestos fenólicos totales se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (*GAE*) / 100 g de producto(b.s.) con la Ecuación (12).

$$GAE \left( \frac{mg}{100 \text{ g producto (b.s.)}} \right) = \left( \frac{Abs - b}{m} \right) \times DF \times 100 \quad (12)$$

Donde *Abs* = absorbancia de la muestra a 765 nm, *b* = intercepción (0.030), *m* = pendiente (0.018), y *DF* = factor de dilución de la muestra.

### 3.2.7.4 Antocianinas monoméricas totales

Las antocianinas monoméricas totales (*Mlv*) se evaluaron con el método del pH diferencial (Giusti y Wrolstad, 2001; Schou, 1927). Se mezcló una alícuota de 100  $\mu\text{L}$  de extracto y 300  $\mu\text{L}$  de agua destilada con 1600  $\mu\text{L}$  de buffer de cloruro de potasio (pH 1) o 1600  $\mu\text{L}$  de tampón de acetato de sodio (pH 4.5). Ambas mezclas se prepararon por duplicado a temperatura ambiente ( $25 \pm 1$  °C) en la oscuridad. Las absorbancias a 520 y 700 nm se leyeron utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (Shimadzu, UV-1900i, Tokio, Japón). Las antocianinas monoméricas totales se calcularon con las Ecuaciones (13) y (14):

$$\text{Abs} = (\text{Abs}_{520\text{nm}} - \text{Abs}_{700\text{nm}})_{\text{pH } 1.0} - (\text{Abs}_{520\text{nm}} - \text{Abs}_{700\text{nm}})_{\text{pH } 4.5} \quad (13)$$

$$Mlv \left( \frac{\text{mg}}{100 \text{ g b.s.}} \right) = \frac{\text{Abs} \times MW \times DF \times 1000}{\epsilon \times 1} \quad (14)$$

donde *Abs* = absorbancia, *MW* = peso molecular del Malvidin-3,5-diglucósido (655.4 g / mol), *DF* = factor de dilución de la muestra, 1000 = factor de conversión de g a mg,  $\epsilon$  = coeficiente de extinción molar del Malvidin-3,5-diglucósido (10700 L / mol cm), 1 = recorrido de la luz a lo largo de la célula de cuarzo (1 cm). Los resultados se expresan en mg de Malvidina-3,5-diglucósido / 100 g de producto (b.s.).

### 3.2.8 Observaciones de la microestructura

La microestructura de las muestras frescas y tratadas se observó utilizando un microscopio (Axio Observer Z1, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Alemania), una cámara acoplada al microscopio (AxioCam ERc 5s, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Alemania) y el software de microscopía (ZEN blue edition, 2011, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Alemania). Antes del análisis, se realizó un corte de 1 mm de grosor con una cuchilla afilada de la parte central de la muestra.

### 3.2.9 Análisis estadístico

Como variables independientes para los experimentos se seleccionaron la reducción de la presión, la concentración del agente osmótico y el tiempo de inmersión, que se ha comprobado que modifican la calidad y la transferencia de masa del producto impregnado (Corrêa *et al.*, 2014; González-Pérez *et al.*, 2021; Mújica-Paz *et al.*, 2003b; Rosenthal *et al.*, 2018). Las condiciones experimentales se establecieron según un modelo de diseño Box-Behnken de tres factores y tres niveles con cinco réplicas en el punto central. Las variables independientes se codificaron en tres niveles (-1, 0 y 1 considerando el nivel bajo, medio y alto, respectivamente) utilizando la Ecuación (15). Las variables independientes reales y codificadas del diseño se enumeran en la **Tabla 3.2.1**. Se estimaron un total de 17 experimentos según la Ecuación (16). Las respuestas consideradas para el análisis fueron algunos parámetros de la manzana impregnada como  $WL$ ,  $SG$ ,  $a_w$ ,  $TSS$  (°Brix), actividad antioxidante, compuestos fenólicos totales, antocianina monomérica total, parámetros de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , °Hue,  $C^*$  y  $\Delta E$ ), imágenes de impregnación de color y volumen adimensional ( $V/V_0$ ). Cada experimento se realizó por triplicado. Se calcularon las medias y la desviación estándar (SD) de las respuestas.

$$X_i = \frac{Z_i - Z_c}{\Delta Z_i}, i = 1, 2, 3, \dots, j \quad (15)$$

Donde  $Z_i$  es el valor codificado de la variable independiente (VP: reducción de presión en mmHg, t: tiempo en min y C: concentración del agente osmótico en °Brix),  $X_i$  es el valor adimensional de  $Z_i$ ,  $Z_c$  es la  $Z_i$  en el punto central y  $\Delta Z_i$  es el cambio de paso de la variable  $i$ .

$$N = 2p(p - 1) + C_p \quad (16)$$

Donde  $N$  = número de experimentos,  $p$  = número de factores y  $C_p$  = número de puntos centrales. El error experimental se calculó a partir de los datos de los puntos centrales (Salman *et al.*, 2020).

Todos los datos experimentales se realizaron por duplicado y los valores medios se analizaron ajustando los datos experimentales al modelo polinómico de segundo orden de la Ecuación (17). La significación estadística del modelo se analizó con el ANOVA, que se realizó utilizando el software estadístico *Minitab v.17* (Minitab Inc., State College, PA, EE. UU.). El ajuste del modelo se realizó mediante el "procedimiento de eliminación hacia atrás", eliminando así los términos no significativos. Se utilizó un valor  $p \leq 0.1$  para establecer diferencias significativas dentro de las medias.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (17)$$

Donde  $Y$  = respuesta estimada,  $X_i$  ( $i = 1, 2$  y  $3$ ; 1, reducción de presión; 2, tiempo, y 3, concentración de agente osmótico) = variable independiente,  $\beta_0$  = coeficiente de intercepción,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  son coeficientes lineales,  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$  y  $\beta_{33}$  son los coeficientes cuadráticos y  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$  y  $\beta_{23}$  son los coeficientes de interacción.

**Tabla 3.2.1** Diseño experimental Box-Behnken con valor real o codificado (número entre paréntesis: -1, nivel bajo; 0, nivel medio o 1, nivel alto) para la impregnación de manzanas.

Experimento	Reducción de presión, $VP$ (mmHg)	Tiempo, $t$ (min)	Concentración, $C$ (°Brix)
1	100 (-1)	10 (-1)	50 (0)
2	100 (-1)	20 (0)	40 (-1)
3	100 (-1)	20 (0)	60 (1)
4	100 (-1)	30 (1)	50 (0)
5	300 (0)	10 (-1)	40 (-1)
6	300 (0)	10 (-1)	60 (1)
7a	300 (0)	20 (0)	50 (0)
8a	300 (0)	20 (0)	50 (0)
9a	300 (0)	20 (0)	50 (0)
10a	300 (0)	20 (0)	50 (0)
11a	300 (0)	20 (0)	50 (0)
12	300 (0)	30 (1)	40 (-1)
13	300 (0)	30 (1)	60 (1)
14	500 (1)	10 (-1)	50 (0)
15	500 (1)	20 (0)	40 (-1)
16	500 (1)	20 (0)	60 (1)
17	500 (1)	30 (1)	50 (0)

a: puntos centrales (para determinar el error experimental).

### 3.3 Resultados y discusión

#### 3.3.1 Respuestas de la impregnación al vacío de la manzana según el diseño Box-Behnken

Las respuestas experimentales de las 17 series de impregnación al vacío de la manzana según el diseño Box-Behnken (**Tabla 3.2.1**) se muestran en las **Tablas 3.3.1-3.3.3**.

La **Tabla 3.3.4** muestra los efectos significativos de las variables del proceso en la Ecuación polinómica de segundo orden utilizada para describir cada variable de respuesta. Los modelos polinómicos se obtuvieron tras eliminar los términos no significativos ( $p >$

0.1). Se mantuvieron algunos términos no significativos ( $p > 0.1$ ) para jerarquizar el modelo. Según el análisis de la varianza, todos los modelos no codificados (excepto el de ganancia de soluto,  $SG$ ) tuvieron una falta de ajuste no significativa ( $P > 0.05$ ), lo que implica que fueron suficientemente precisos para predecir las respuestas. Los valores del coeficiente de determinación ( $R^2 > 0.900$ , **Figuras S1, S2, S3 y S4**) para  $WL$ ,  $TSS$ ,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $^{\circ}Hue$ ,  $\Delta E$ ,  $A_U/A_{OP}$  y  $AA$  indicaron que la ecuación del modelo polinómico se ajustaba bien a los datos experimentales.

**Tabla 3.3.1** Resultados del diseño experimental para la actividad del agua ( $a_w$ ), los sólidos solubles totales ( $TSS$ ,  $^{\circ}Brix$ ) y los parámetros de transferencia de masa de la impregnación de cubos de manzana con soluciones de diferentes concentraciones.

$VP^a$	$t^b$	$C^c$	$WL^d$	$SG^e$	$a_w$	$TSS$
100	10	50	0.213±0.009	0.022±0.004	0.969±0.001	13.9±0.1
100	20	40	0.179±0.003	0.019±0.001	0.971±0.002	13.6±0.0
100	20	60	0.262±0.009	0.027±0.001	0.965±0.005	14.2±0.1
100	30	50	0.252±0.003	0.033±0.003	0.966±0.001	16.5±0.1
300	10	40	0.120±0.003	0.036±0.001	0.979±0.001	13.6±0.1
300	10	60	0.207±0.012	0.048±0.001	0.976±0.002	15.5±0.1
300	20	50	0.253±0.029	0.037±0.002	0.968±0.001	17.8±0.1
300	20	50	0.234±0.010	0.031±0.000	0.969±0.002	17.7±0.2
300	20	50	0.242±0.00	0.036±0.000	0.972±0.003	17.5±0.3
300	20	50	0.230±0.018	0.031±0.004	0.975±0.003	17.3±0.2
300	20	50	0.233±0.008	0.028±0.006	0.967±0.001	17.8±0.1
300	30	40	0.210±0.003	0.032±0.003	0.976±0.000	15.1±0.1
300	30	60	0.305±0.025	0.041±0.010	0.968±0.001	19.6±0.1
500	10	50	0.171±0.003	0.022±0.001	0.976±0.000	13.7±0.1
500	20	40	0.184±0.004	0.027±0.001	0.974±0.005	13.5±0.1
500	20	60	0.270±0.023	0.028±0.003	0.968±0.001	15.6±0.0
500	30	50	0.262±0.011	0.051±0.002	0.969±0.002	16.6±0.1

Los resultados se presentan como promedio  $\pm$  SD (desviación estándar,  $n = 3$ ). <sup>a</sup> $VP$ , reducción de presión (mmHg); <sup>b</sup> $t$ , tiempo (min); <sup>c</sup> $C$ , concentración de solución osmótica ( $^{\circ}Brix$ ); <sup>d</sup> $WL$ , pérdida de agua (g / g); <sup>e</sup> $SG$ , ganancia de solutos (g/g).

**Tabla 3.3.2** Resultados del diseño experimental para los parámetros de color de los cubos de manzana impregnados con soluciones.

<i>VP</i> <sup>a</sup>	<i>t</i> <sup>b</sup>	<i>C</i> <sup>c</sup>	<i>L</i> <sup>*</sup>	<i>a</i> <sup>*</sup>	<i>b</i> <sup>*</sup>	<i>Hue</i> (°)	<i>C</i> <sup>*d</sup>	$\Delta E$ <sup>e</sup>
100	10	50	36.09±8.62	15.38±3.44	16.04±2.32	46.39±10.16	22.45±1.30	44.20±9.04
100	20	40	36.19±9.93	16.19±3.92	14.07±2.39	41.48±11.70	21.75±1.32	44.44±10.56
100	20	60	27.70±3.39	17.88±1.50	10.77±2.64	30.75±5.93	20.95±2.15	52.94±3.23
100	30	50	31.10±6.71	18.14±0.54	13.51±3.49	36.16±7.40	22.75±2.14	49.97±6.09
300	10	40	29.72±5.77	16.61±1.36	10.82±2.99	32.67±7.84	19.96±1.93	50.60±5.61
300	10	60	27.30±6.77	14.21±1.27	9.25±3.75	31.89±9.18	17.12±2.92	52.10±6.27
300	20	50	30.33±5.15	17.00±0.59	11.19±1.12	33.34±3.54	20.37±0.12	50.11±4.96
300	20	50	28.73±0.62	15.55±0.01	11.11±0.76	35.53±1.88	19.11±0.44	50.96±0.62
300	20	50	28.73±0.61	15.55±0.01	11.11±0.73	35.53±1.87	7.64±5.47	50.11±4.96
300	20	50	30.33±5.15	17.00±0.59	11.19±1.12	33.34±3.54	8.15±1.16	50.96±0.62
300	20	50	30.33±5.15	17.00±0.58	11.19±1.10	33.34±3.53	8.15±1.01	50.11±4.96
300	30	40	32.56±4.44	15.56±1.18	13.36±1.58	40.61±4.89	20.56±0.95	47.39±4.49
300	30	60	28.11±5.72	15.13±2.36	8.08±2.20	26.74±8.37	17.31±4.02	51.85±5.44
500	10	50	21.23±1.62	9.44±0.80	5.13±1.00	28.40±4.01	10.76±1.04	56.77±1.68
500	20	40	19.79±1.66	7.92±1.75	3.69±1.60	24.10±4.76	8.75±2.25	58.08±1.55
500	20	60	20.44±2.00	8.08±1.86	3.70±1.55	22.51±5.07	8.91±2.29	57.49±2.00
500	30	50	20.83±3.94	8.56±1.65	4.70±1.26	27.63±8.91	9.85±2.37	57.06±3.93

Los resultados se presentan como promedio  $\pm$  SD (desviación estándar,  $n = 3$ ). <sup>a</sup>*VP*, reducción de presión (mmHg); <sup>b</sup>*t*, tiempo (min); <sup>c</sup>*C*, concentración de agente osmótico (°Brix); <sup>d</sup>*C*<sup>\*</sup>, croma; <sup>e</sup> $\Delta E$ , diferencia neta de color ( $L_0^* = 75.43 \pm 3.26$ ,  $a_0^* = -4.55 \pm 2.19$ ,  $b_0^* = 14.55 \pm 0.00$ ).

**Tabla 3.3.3** Resultados del diseño experimental para el volumen adimensional ( $V/V_0$ ), el área de distribución del color del soluto impregnado ( $A_U/A_{OP}$ ) y las características antioxidantes de los cubos de manzana impregnados con soluciones.

$VP^a$	$t^b$	$C^c$	$V/V_0$	$A_U/A_{OP}$	$AA^d$	$TPC^e$	$Mlv^f$
100	10	50	0.83±0.04	0.28±0.01	826.27±26.71	623.14±3.59	24.00±1.41
100	20	40	0.87±0.06	0.30±0.06	815.41±25.59	604.90±2.14	24.24±2.31
100	20	60	0.77±0.05	0.34±0.08	860.00±12.47	564.28±1.27	24.10±0.01
100	30	50	0.81±0.05	0.28±0.04	858.85±23.93	453.04±1.27	24.73±0.19
300	10	40	0.82±0.02	1.00±0.00	820.00±11.84	569.05±4.49	19.67±0.12
300	10	60	0.75±0.05	1.00±0.01	873.45±42.90	662.91±3.40	23.55±3.19
300	20	50	0.83±0.05	1.00±0.00	948.62±35.11	574.81±8.17	24.21±2.28
300	20	50	0.74±0.04	1.00±0.00	924.77±34.32	574.81±8.17	26.55±1.03
300	20	50	0.79±0.05	1.00±0.00	924.08±33.05	574.81±8.14	25.26±2.29
300	20	50	0.76±0.04	1.00±0.00	949.31±20.21	524.44±3.64	25.46±2.57
300	20	50	0.70±0.05	1.00±0.01	924.08±24.51	546.73±3.15	23.05±1.05
300	30	40	0.75±0.08	0.55±0.05	877.43±44.45	642.99±4.40	22.61±5.01
300	30	60	0.65±0.05	0.48±0.06	919.27±24.53	684.27±0.67	31.20±1.16
500	10	50	0.74±0.01	1.00±0.00	900.76±21.45	627.72±3.05	19.09±1.20
500	20	40	0.70±0.07	1.00±0.00	808.88±14.36	528.25±5.60	22.46±0.05
500	20	60	0.68±0.04	1.00±0.00	979.52±18.55	650.82±1.06	27.13±3.94
500	30	50	0.64±0.02	1.00±0.00	905.18±11.77	697.62±2.55	30.27±0.03

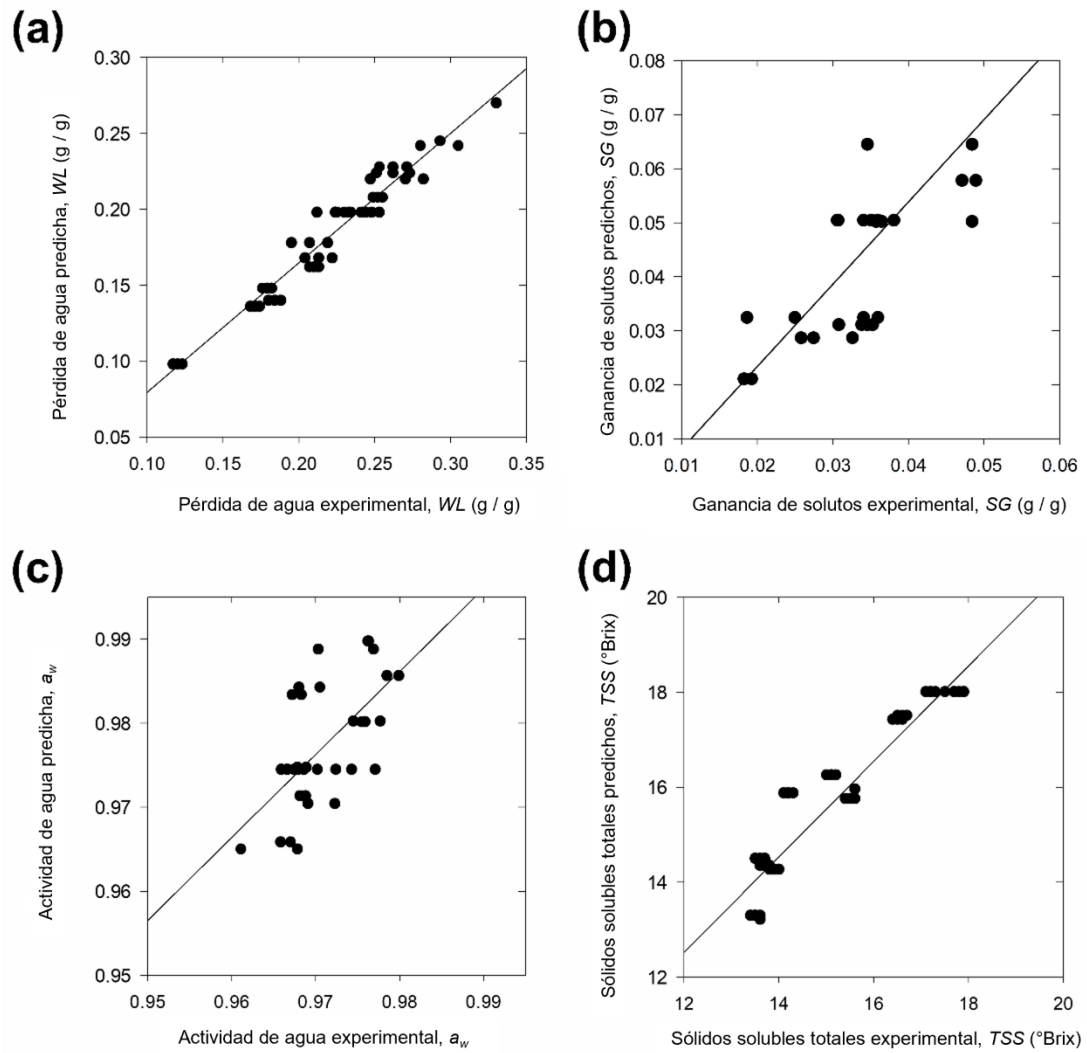
Los resultados se presentan como promedio  $\pm$  SD (desviación estándar,  $n = 3$ ). <sup>a</sup> $VP$ , reducción de presión (mmHg); <sup>b</sup> $t$ , tiempo (min); <sup>c</sup> $C$ , concentración de agente osmótico ( $^{\circ}$ Brix); <sup>d</sup> $AA$ , actividad antioxidante (g TE / 100 g producto (b.s.)); <sup>e</sup> $TPC$ , compuestos fenólicos totales (mg GAE / 100g producto (b.s.)); <sup>f</sup> $Mlv$ , antocianina monomérica total (mg  $Mlv$  / 100g producto (b.s.)).



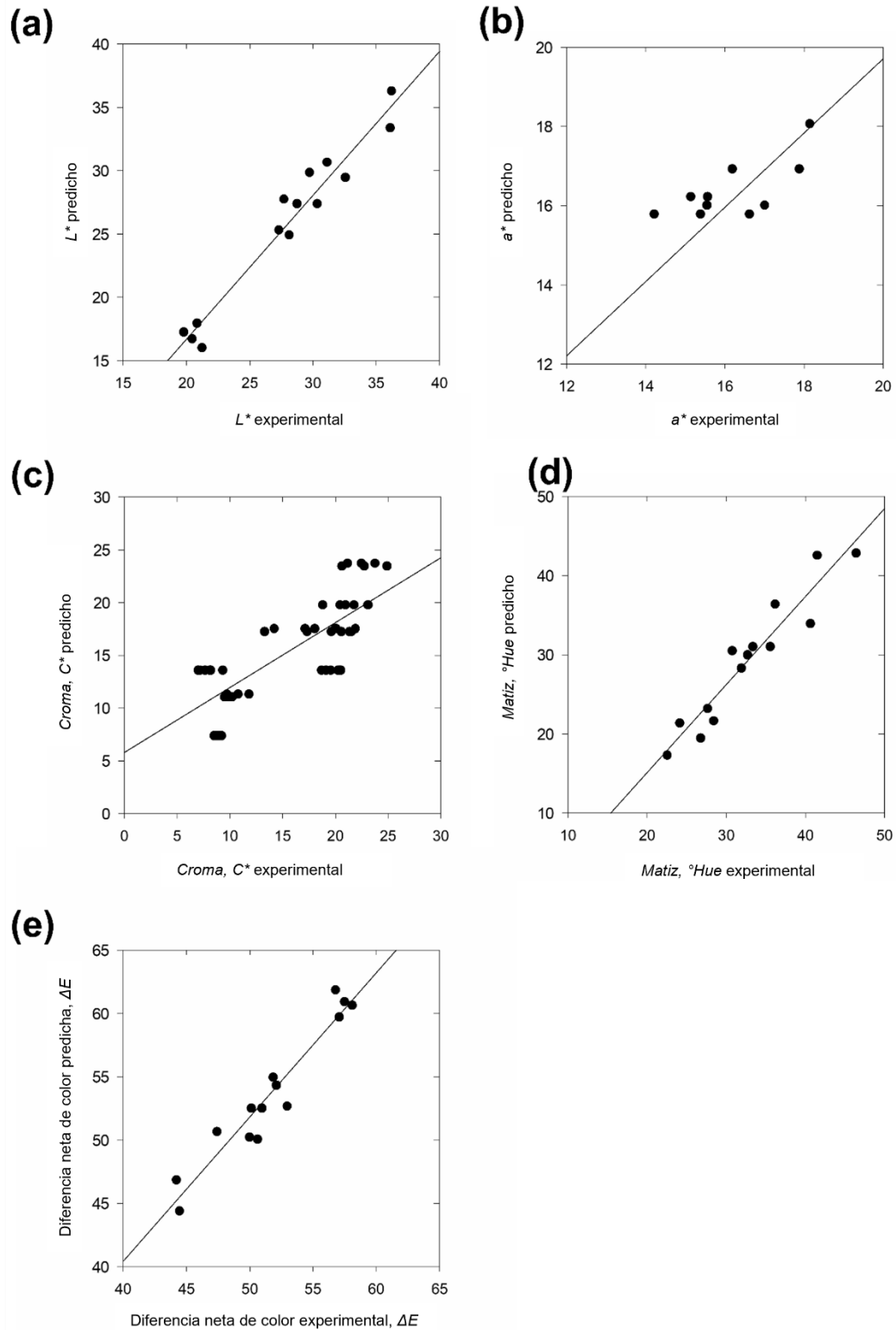
Tabla 3.3.4 Coeficientes de regresión del modelo de diseño Box-Behnken.

Y	Coeficientes										R <sup>2</sup>	Falta de ajuste (Valor de P)
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$\beta_{33}$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$		
WL	<b>-0.43*</b>	<b>-1.4E-4*</b>	<b>0.007*</b>	<b>0.018*</b>	-	<b>-1.4E-4*</b>	<b>-1.4E-4*</b>	<b>6.0E-6*</b>	-	-	0.909	0.1
SG	<b>0.03*</b>	<b>8.1E-5*</b>	<b>-0.003*</b>	<b>3.8E-4*</b>	-	<b>6.7E-5*</b>	-	<b>2.0E-6**</b>	-	-	0.608	0
$a_w$	<b>1.04*</b>	<b>5.3E-5*</b>	<b>-0.001*</b>	<b>-0.002*</b>	<b>-1.0E-7*</b>	<b>2.9E-5*</b>	<b>1.9E-5*</b>	-	-	-	0.663	0.54
TSS	<b>-22.13*</b>	0.032	<b>-0.192*</b>	<b>1.293*</b>	<b>-5.3E-5*</b>	-	<b>-0.013*</b>	-	-	<b>0.007*</b>	0.943	0.06
L*	<b>62.43*</b>	<b>-0.056*</b>	-0.194	<b>-0.527*</b>	<b>-7.2E-5*</b>	-	-	<b>5.8E-4**</b>	<b>0.001*</b>	-	0.955	0.1
$a^*$	<b>11.76*</b>	<b>0.037*</b>	0.16	-	<b>-8.1E-5*</b>	-	-	<b>-4.6E-4**</b>	-	-	0.945	0.34
Hue	<b>-21.97*</b>	<b>-0.113*</b>	1.178	<b>3.037*</b>	-	-	<b>-0.031*</b>	<b>0.001**</b>	<b>0.001**</b>	<b>-0.032*</b>	0.915	0.06
C*	<b>38.38*</b>	<b>-0.031*</b>	-1.534	-	-	<b>0.038**</b>	-	-	-	-	0.648	0.99
$\Delta E$	<b>17.73*</b>	<b>0.062*</b>	0.238	0.514	<b>5.4E-5*</b>	-	-	<b>-6.9E-4*</b>	<b>-0.001*</b>	-	0.933	0.12
VVo	<b>1.11*</b>	<b>-3.2E-4*</b>	<b>-0.004*</b>	<b>-0.004*</b>	-	-	-	-	-	-	0.78	0.97
$A_U/A_{OP}$	<b>-3.07*</b>	<b>5.2E-3*</b>	<b>0.041*</b>	0.11	<b>-6.0E-5*</b>	<b>-1.30E-3*</b>	<b>-0.001**</b>	-	-	-	0.923	0.08
AA	<b>-134.00*</b>	<b>-0.126*</b>	<b>12.990*</b>	<b>32.860*</b>	<b>-8.6E-4*</b>	<b>-0.280*</b>	<b>-0.337*</b>	-	<b>0.016*</b>	-	0.9	0.08
TPC	<b>1068.70*</b>	<b>-1.458**</b>	-28.48	-3.4	-	<b>0.485*</b>	-	<b>0.030*</b>	<b>0.020*</b>	-	0.694	0.06
Mlv	<b>36.60*</b>	-0.055	<b>-0.701*</b>	<b>-0.203*</b>	-	-	-	<b>1.3E-3*</b>	<b>6.0E-4**</b>	<b>0.012**</b>	0.895	0.58

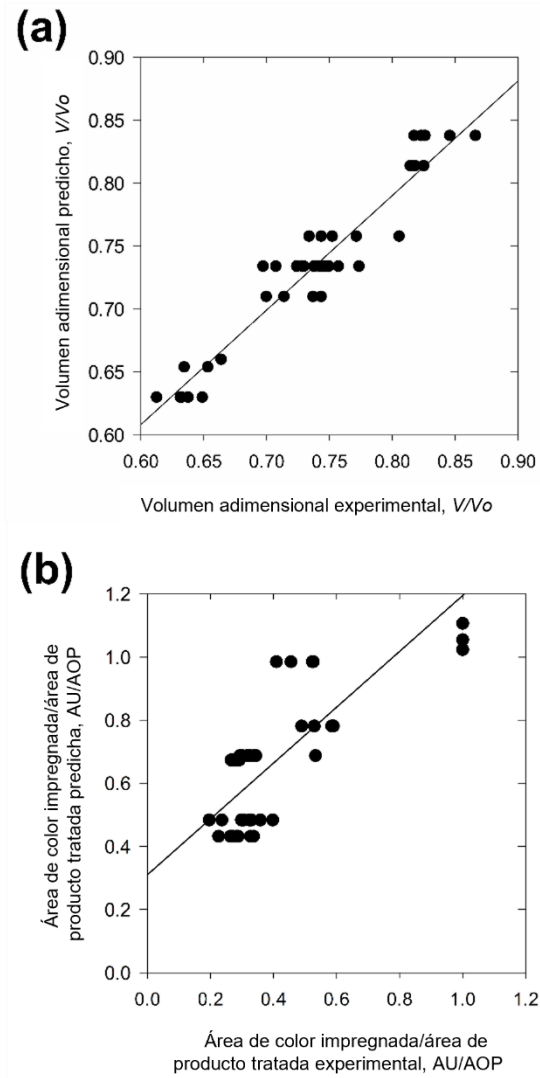
Y, respuesta;  $\beta_i$ , coeficiente no codificado (considerando  $i = 0, 1, 2$  y  $3$  para el intercepto, la reducción de presión, el tiempo y la concentración del agente osmótico, respectivamente; WL, pérdida de agua (g/ g); SG, ganancia de sólidos (g/ g);  $a_w$ , actividad de agua; TSS, sólidos solubles totales (°Brix); C\*, cromas;  $\Delta E$ , diferencia neta de color; VVo, volumen adimensional;  $A_U/A_{OP}$ , área de color impregnada/área de producto tratado; AA, actividad antioxidante (mg TE/ 100g producto (b.s.)); TPC, compuestos fenólicos totales (mg GAE/ 100g producto (b.s.)); Mlv, antocianinas monoméricas totales (mg Malvidin-3,5-diglu/ 100g producto (b.s.)). Los parámetros en negrita tienen un efecto significativo (\* $p \leq 0.05$  and \*\*  $p \leq 0.10$ ) en Y



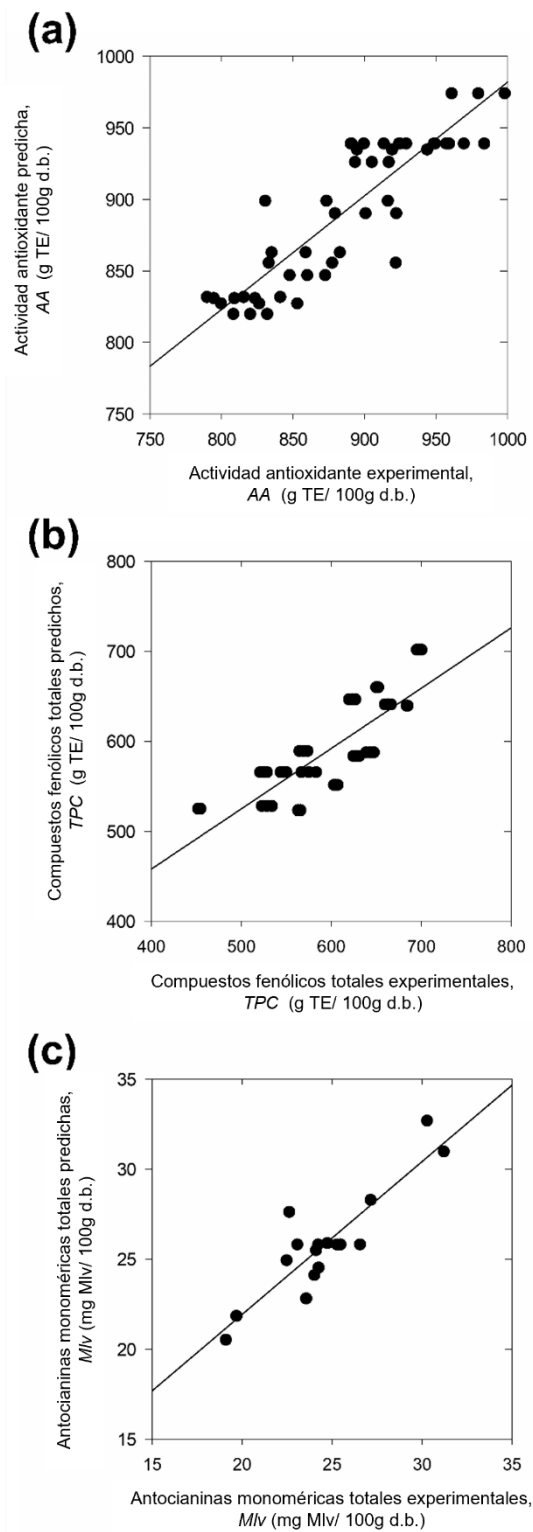
**Figura S1.** Comparación entre los valores predichos y experimentales de **(a)** pérdida de agua, **(b)** ganancia de solutos, **(c)** actividad de agua y **(d)** sólidos solubles totales.



**Figura S2.** Comparación entre los valores predichos y experimentales de (a)  $L^*$ , (b)  $a^*$ , (c) Croma, y (d) Matiz ( $^{\circ}Hue$ ), y (e) diferencia total de color.



**Figura S3.** Comparación entre los valores predichos y experimentales de (a) volumen adimensional, y (b) área de color impregnada / área de producto tratada.



**Figura S4.** Comparación entre los valores predichos y experimentales de (a) actividad antioxidante, (b) compuesto fenólico total, y (c) antocianina monomérica total.

En general, la ecuación polinómica de segundo orden mostró que los parámetros relacionados con la transferencia de masa (*WL* y *SG*) se vieron significativamente afectados principalmente por los coeficientes lineales (reducción de presión, tiempo y concentración), los coeficientes cuadráticos del tiempo y la interacción presión-reducción-tiempo ( $p \leq 0.05$ ). Por otra parte, la *WL* se vio significativamente afectado por los coeficientes cuadráticos de la concentración del agente osmótico. Se observó una interacción tiempo-concentración ( $p \leq 0.05$ ) para el *SST*. Los parámetros de color se vieron afectados por la reducción de la presión. En el caso de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $^{\circ}Hue$ , y  $\Delta E$  fueron significativos, y se observaron algunas interacciones; se discutirán más adelante en otras secciones. El  $V / V_0$  se vio afectado ( $p \leq 0.05$ ) sólo por los coeficientes lineales de las variables analizadas. Los coeficientes cuadráticos de las variables analizadas tuvieron un efecto significativo ( $p \leq 0.05$ ) en la  $A_U / A_{OP}$ . Por último, los términos lineales y cuadráticos fueron significativos ( $p \leq 0.05$ ) para la respuesta *AA*. Por el contrario, el *TPC* se rigió por el término cuadrático del tiempo ( $p \leq 0.05$ ) y el *Mlv* por los términos lineales del tiempo y la concentración ( $p \leq 0.05$ ). Las respuestas de los compuestos bioactivos mostraron que las interacciones presión-reducción-tiempo (para la respuesta de *Mlv*), presión-reducción-concentración (respuestas de *AA*, *TPC* y *Mlv*) y tiempo-concentración (*Mlv* y *TPC*, respuestas) fueron significativas ( $p \leq 0.1$ ).

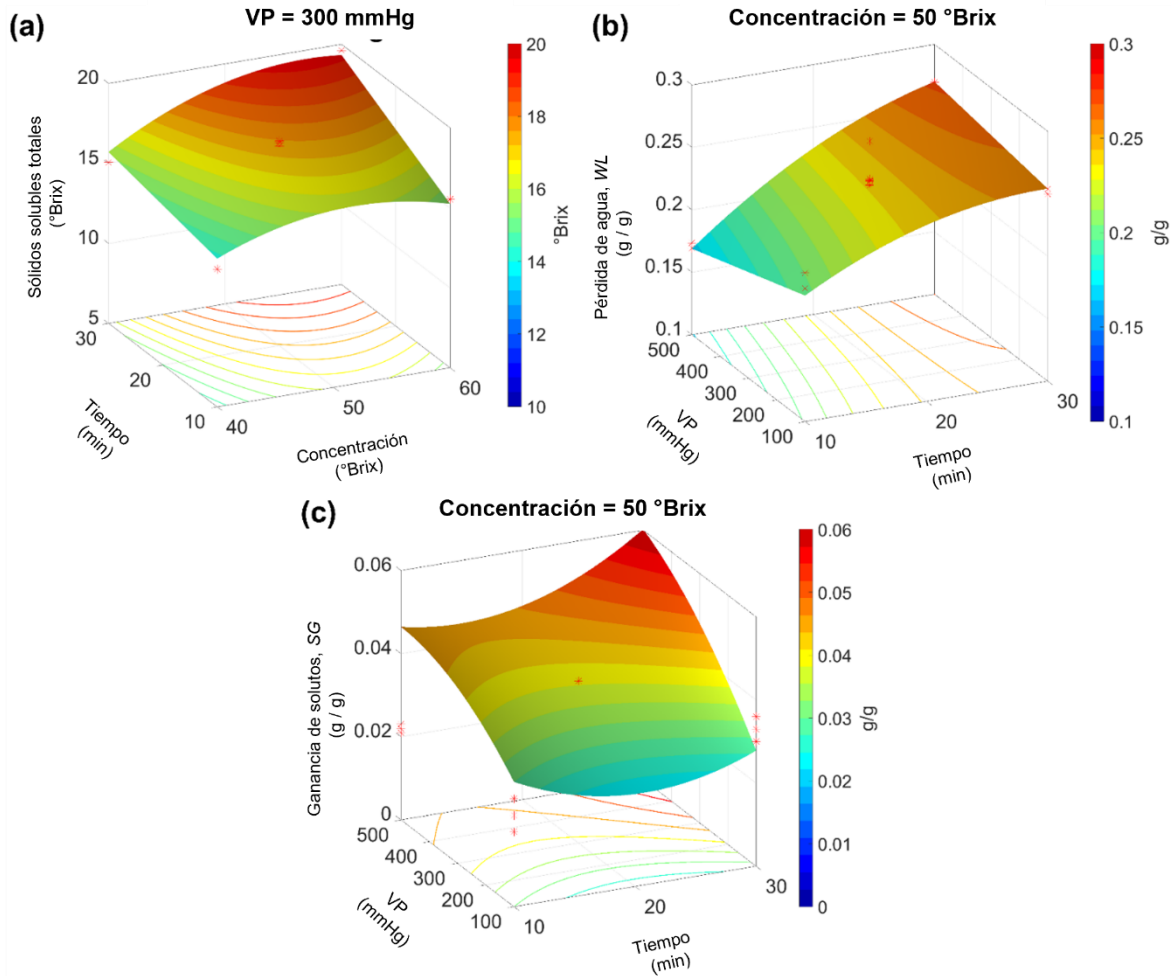
### 3.3.2 Influencia de las variables del proceso en la actividad del agua, los sólidos solubles totales y los parámetros de transferencia de masa

La  $a_w$  de la manzana fresca era de  $0.984 \pm 0.004$  ( $25 \pm 0.1$  °C). Tras el proceso de impregnación al vacío, las muestras alcanzan una  $a_w$  en el rango de 0.965 - 0.979. Xie y Zhao (2003) observaron una ligera reducción de la  $a_w$  de las manzanas Royal gala: de 0.980 (manzana fresca) a 0.975 - 0.978 (manzana impregnada con 50 % y 20 % de jarabe de maíz añadido con Gluconal, lactato de zinc y ácido ascórbico). Según el ANOVA, el modelo de la Ecuación (17) presentó una falta de ajuste no significativa (valor  $P > 0.05$ ). Sin embargo, no fue adecuado para describir el comportamiento de los datos experimentales ( $R^2 = 0.630$ , **Figura S1c**). Assis *et al.* (2019) reportaron diferencias no significativas ( $p > 0.05$ ) entre las manzanas frescas rebanadas ( $a_w = 0.991 - 0.995$ ) y las sometidas a impregnación al vacío

(75 - 225 mmHg) con soluciones de lactato de calcio al 1 %. El mismo comportamiento fue observado por Xie y Zhao (2003) en manzanas gala con dos concentraciones diferentes de jarabe de maíz.

Los *SST* de los cubos de manzana aumentó de  $12.1 \pm 0.9$  a  $13.5 - 19.6$  °Brix. El modelo para los *SST* mostró que los términos lineales (tiempo y concentración de la solución) tuvieron un efecto considerable ( $p \leq 0.1$ ); lo mismo ocurrió con los términos cuadráticos de reducción de presión y concentración. Se puede observar (**Figura 3.3.1a**) que, para tiempos largos, el contenido de *SST* también aumentó, excepto para tiempos superiores a 50 min, lo que explica el término cuadrático. Los resultados concuerdan con Fito y Chiralt (1995), quienes mencionan que el tratamiento es más rápido durante los primeros 60 min. Esto indica que es necesaria una adecuada aplicación del tiempo de proceso para lograr el equilibrio mecánico (salida de gases e incorporación de fluidos externos) (Escobedo-Avellaneda *et al.*, 2018). Por otro lado, Xie y Zhao (2003) estudiaron el efecto de la concentración sobre los *SST* en manzanas Royal Gala impregnadas con jarabe de maíz de fructosa. Observaron que el valor de *SST* aumenta en la muestra al aumentar la concentración de solutos en la solución.

Del mismo modo, en este estudio se observa el mismo comportamiento. En cuanto al término cuadrático de reducción de presión, algunos estudios reportaron que un nivel adecuado de reducción de presión es necesario para evitar la *WL*, aumentando la *SG* que ocupa los poros de la matriz (Mújica-Paz *et al.*, 2003b). Por otro lado, una reducción de presión elevada podría destruir las células e impedir la *WL* y la *SG* (Sette *et al.*, 2017). Además, solo la interacción tiempo-concentración tuvo un impacto significativo ( $p \leq 0.1$ ) en la respuesta. La **Figura 3.3.1a** muestra que el tiempo de procesado tuvo un efecto lineal sobre el *SST* de la manzana. El aumento del tiempo de procesado y de la concentración de la solución osmótica favoreció el aumento de los *SST*.



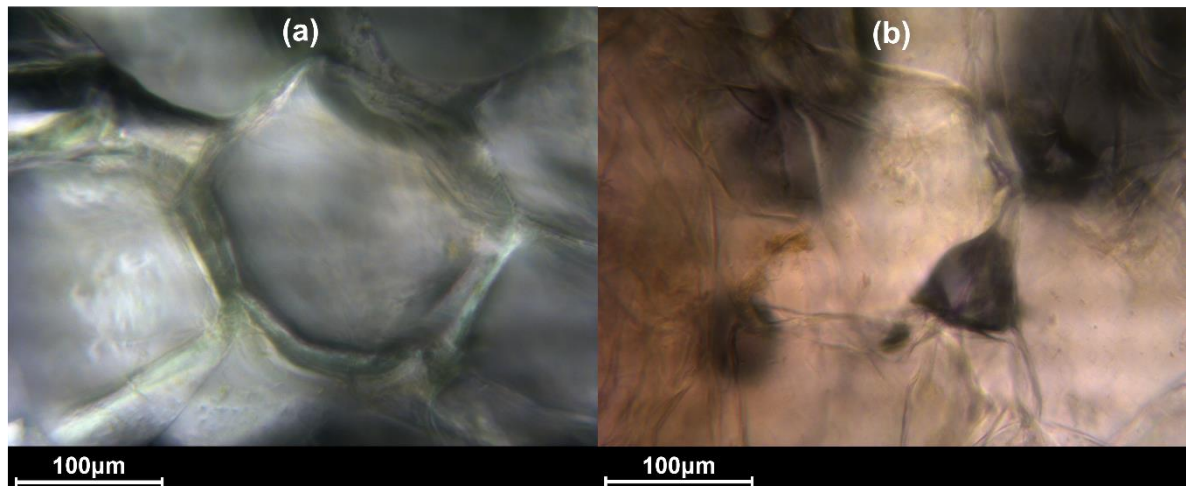
**Figura 3.3.1** Efecto de la interacción tiempo-concentración en (a) los sólidos solubles totales ( $SST = -22.13 + 0.031VP - 0.192t + 1.293C - 5.3E-5 VP^2 - 0.013C^2 + 0.007tC$ ), y de la interacción reducción de presión-tiempo en (b) la pérdida de agua ( $WL = -0.43 - 1.4E-4VP + 0.007t + 0.018C - 1.4E-4t^2 - 1.4E-4C^2 + 6.0E-6VPt$ ), y (c) ganancia de solutos ( $SG = 0.03 + 8.1E-5VP - 0.003t + 3.8E-4C + 6.7E-5t^2 + 2.0E-6VPt$ ) de los cubos de manzana impregnados con jugo de uva concentrado. Los puntos corresponden a los datos experimentales.

En la **Tabla 3.3.1** se observó una amplia gama de variaciones en los parámetros de transferencia de masa. Por ejemplo, 0.120 - 0.305 g de agua / g de muestra y 0.019 - 0.051 g de solutos / g de muestra para *WL* y *SG*, respectivamente. La ecuación del modelo (17) describe bien los datos experimentales de *WL* ( $R^2 = 0.966$ , **Tabla 3.3.4**, **Figura S1a**). Los términos lineales y cuadráticos para el tiempo y la concentración fueron significativos ( $p \leq 0.05$ ), así como una interacción entre la reducción de presión y el tiempo ( $p \leq 0.05$ ). La



interacción reducción de presión-tiempo se muestra en la **Figura 3.3.1b**. Se observó un ligero efecto de la reducción de la presión, especialmente en los tiempos largos. La tasa de impregnación *WL* aumentó con el tiempo ( $p \leq 0.05$ ). La reducción de presión elevada (500 mmHg) en tiempos cortos (10 min) podría afectar a la estructura celular y bloquear la salida de agua. El término cuadrático sobre la concentración podría explicarse por la viscosidad (Guz *et al.*, 2020). Otros investigadores han mencionado que el aumento de la concentración de la solución (30 – 60 °Brix de sacarosa) y el tiempo de proceso (10 - 50 min) promueve la *WL* durante la impregnación al vacío (100 mmHg) de la corteza de sandía osmodeshidratada (Kuo *et al.*, 2018). Una alta concentración de la solución podría dificultar la penetración de la solución en el producto, pero inducir a la *WL*. Por el contrario, viscosidades más bajas impregnan excesivamente la matriz dando lugar a la ganancia de agua (Mújica-Paz *et al.*, 2003b). Esto podría modificarse aumentando la temperatura del sistema (Chiralt *et al.*, 2001).

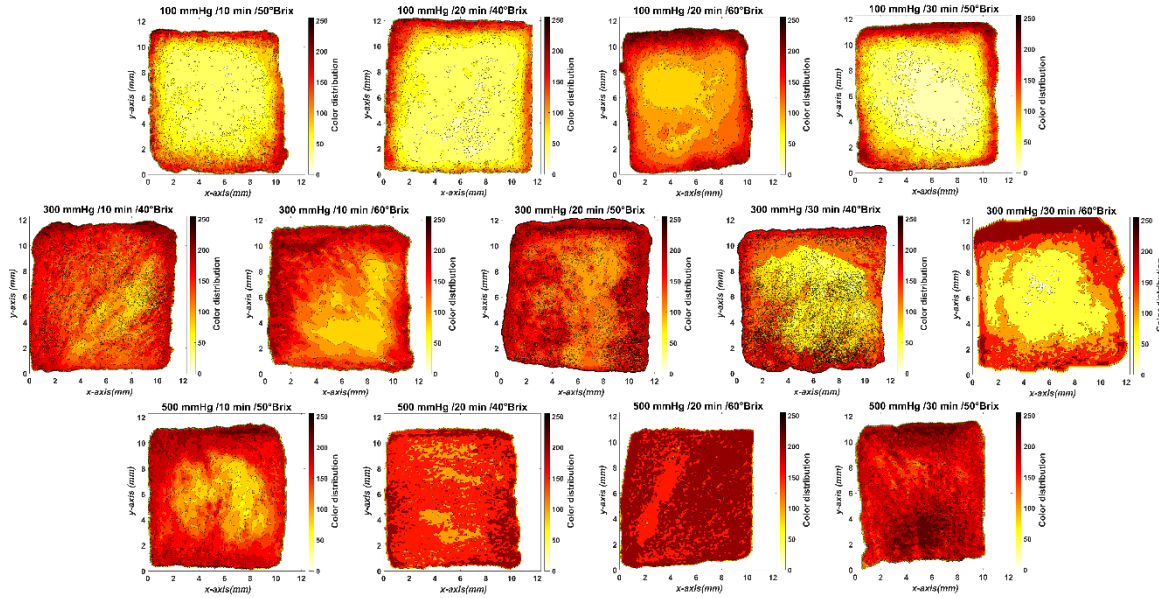
El modelo de *SG* ajustado (**Tabla 3.3.1**) no describió adecuadamente los valores experimentales ( $R^2 = 0.608$ , **Figura S1b**); por lo tanto, se observa una falta de ajuste significativa (valor  $P \leq 0.01$ ). La *SG* se vio afectada significativamente ( $p \leq 0.1$ ) por la interacción presión-reducción-tiempo (**Figura 3.3.1c**) (Mújica-Paz *et al.*, 2003b; Yilmaz y Ersus Bilek, 2017). Sin embargo, se puede observar en la **Figura 3.3.1c** que, al aplicar presiones más bajas y altas, la *SG* es menor en los tiempos más cortos de impregnación al vacío. Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de impregnación al vacío necesita un nivel de vacío preciso para mejorar el proceso (Mújica-Paz *et al.*, 2003b). Asimismo, los niveles de presión adecuados permiten evitar la salida de sólidos (que no penetraron en los poros de la matriz) durante el tiempo de relajación y evitar la disrupción celular causada por las altas reducciones de presión (Assis *et al.*, 2019; Yilmaz y Ersus Bilek, 2017) que impide la transferencia de masa de solutos (González-Pérez *et al.*, 2021). Además, al aumentar el tiempo de elaboración se incrementan los valores de *SG*. La **Figura 3.3.2** muestra la disrupción celular causada por el proceso de vacío a 300 mmHg, 20 min, y 50 °Brix del agente osmótico. Los estudios han indicado que la estructura del tejido se interrumpió debido al tratamiento de presión, lo que dio lugar a la fuga de cromoplastos en el espacio intercelular (Rosenthal *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020); este comportamiento es similar al que se muestra en la **Figura 3.3.2b**.



**Figura 3.3.2** Micrografía del tejido de manzana: (a) fresca, y (b) tejido impregnado a 300 mmHg durante 20 min y 50 °Brix de jugo concentrado de uva.

### 3.3.3 Influencia de las variables del proceso en la impregnación del color y la contracción

El área de sección transversal del soluto impregnado en el producto y las características morfométricas de los cubos impregnados se muestran en la **Figura 3.3.3**. El comportamiento del área de color impregnada ( $A_U$ ) se analizó mediante el área de color impregnada / área de producto tratada ( $A_U / A_{OP}$ ). Según la **Figura 3.3.3**, a bajas presiones, los valores del perfil 2D de la intensidad de los píxeles, a más del 80 % de la impregnación de color del agente osmótico, se vieron favorecidos con altas concentraciones y tiempos de inmersión intermedios. Sin embargo, a presiones intermedias, se observaron algunos valores del perfil 2-D de intensidad de píxeles, a menos del 80 % (color de la muestra fresca) en la parte interna del producto, lo que se debe a que a 300 mmHg y tiempo de inmersión de 30 min, los solutos se acumulan en la superficie de las muestras, provocando una resistencia a la transferencia de masa a través del producto (González-Pérez *et al.*, 2021). Esta acumulación de solutos en la superficie del producto se incrementó con el aumento de la concentración del agente osmótico provocando una menor impregnación al final del proceso. En el caso de presiones de 500 mmHg, la presión es adecuada para favorecer la impregnación a través de la matriz del alimento.



**Figura 3.3.3** Área de distribución del color del soluto impregnado en los cubos de manzana. Se consideran valores del perfil bidimensional de intensidad de píxel entre 80 y 255 como el color del soluto impregnado.

Como se muestra en la **Tabla 3.3.3**, los valores de  $A_U / A_{OP}$  estaban entre 0.28 - 1.00. El valor de  $A_U / A_{OP}$  de 1 indica que el tejido de la manzana estaba completamente teñido. Según el ANOVA, la ecuación de ajuste para  $A_U / A_{OP}$  (**Tabla 3.3.4**) se puede utilizar ( $R^2 = 0.923$ , **Figura S3b**) y la falta de ajuste no es significativa (valor  $P > 0.05$ ) para predecir el comportamiento de  $A_U$  en la reducción de la presión, el tiempo y la concentración del medio osmótico. Los productos completamente teñidos indican que el proceso de osmo-deshidratación ocurre en todo el tejido del producto, lo que implica que la actividad del agua en la parte interna del producto podría reducirse por la incorporación de solutos (Guz *et al.*, 2020). Esto es relevante porque, en los procesos de secado osmoconvectivo, la velocidad de secado puede verse ralentizada debido a la formación de una costra que impide la eliminación del agua presente en el interior del producto. Por tanto, eliminar una mayor cantidad de agua de la parte central del producto durante los pretratamientos mejora la deshidratación durante los procesos osmoconvectivos (González-Pérez *et al.*, 2019). La  $A_U / A_{OP}$  se vio favorecida al aumentar la reducción de la presión utilizando tiempos de inmersión cortos y altas concentraciones de agentes osmóticos ( $p \leq 0.05$ ). Guz *et al.* (2020) analizaron el color del tejido cilíndrico de manzana (var. *Jonagold*) con soluciones de

tinción (violeta de metileno al 2 % y jarabe de almidón), con diferentes coeficientes de viscosidad (1 - 400 mPa·s) durante la impregnación al vacío. Los autores comprobaron que con una presión de 37.5 mmHg durante 0 o 15 min, las muestras alcanzaron  $A_U / A_{OP}$  de 0.75 y 0.80, respectivamente. En general, la impregnación se vio favorecida por la disminución de la viscosidad de la solución. Las viscosidades del jugo concentrado de uva utilizado en este trabajo aumentaron con la concentración del agente osmótico ( $18.31 \pm 0.24$ ,  $52.20 \pm 0.60$ ,  $64.32 \pm 1.20$  mPa·s para 40, 50 y 60 °Brix, respectivamente, evaluados a 40 °C). Con una reducción de la presión de 300 mmHg y un tiempo de inmersión de 30 min, el aumento de la viscosidad del agente osmótico incrementó la acumulación de los solutos del agente osmótico en la superficie del producto reduciendo la tinción del tejido del producto (**Figura 3.3.3** y **Tabla 3.3.3**).

Los valores de contracción se analizaron con la relación  $V / V_0$ . Los valores  $V / V_0$  estaban en el rango de 0.64 - 0.87 (**Tabla 3.3.3**). La ecuación de ajuste predicha con un  $R^2 = 0.780$  (**Figura S3a**) y la falta de ajuste no significativa (valor  $P > 0.05$ ) se muestran en la **Tabla 3.3.4**. La reducción de la presión, el tiempo y la concentración del agente osmótico fueron parámetros significativos del modelo  $V / V_0$ . La contracción del producto se vio afectada principalmente por el aumento de la reducción de la presión. Los valores  $V / V_0$  más bajos se observaron en los cubos de manzana impregnados a 500 mmHg. Algunos autores han informado de que, a determinadas reducciones de presión, el producto impregnado se deforma y encoge (Mújica-Paz *et al.*, 2003a; Yılmaz y Ersus Bilek, 2017). Esta deformación se debe a que, durante el restablecimiento de la presión atmosférica, el tamaño de los poros del producto disminuye a niveles de alta presión debido a la expulsión del aire presente en los poros del producto (González-Pérez *et al.*, 2021). Además, se observó que el tiempo de impregnación redujo la deformación y la contracción de las muestras, este comportamiento se debe a que los solutos impregnados reemplazan el gas atrapado en los poros y proporcionan soporte al tejido del producto, evitando que colapse cuando se restablece la presión atmosférica (Mújica-Paz *et al.*, 2003a; Yılmaz y Ersus Bilek, 2017).

### 3.3.4 Influencia de las variables del proceso en los compuestos bioactivos

Los valores de los compuestos bioactivos de los cubos de manzana impregnados se describen en esta sección.

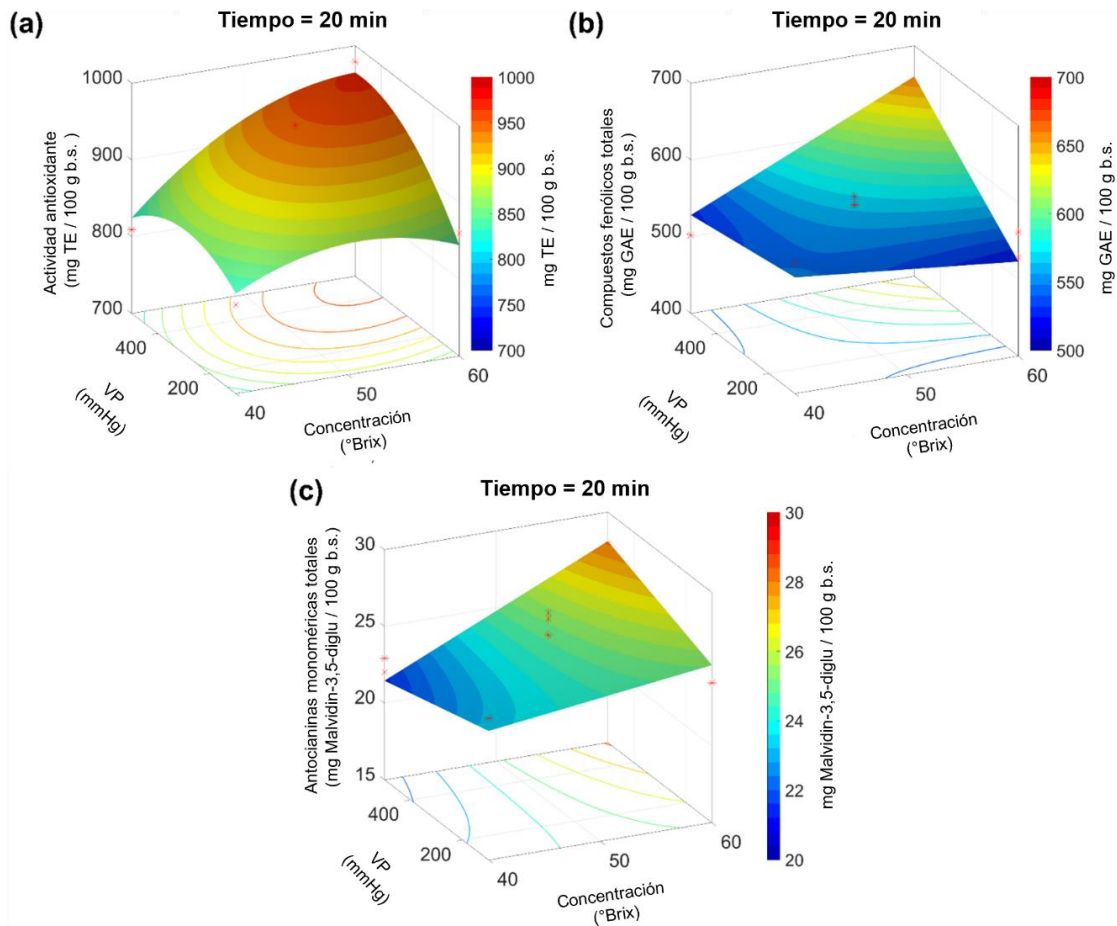
Los valores de *TPC* y *AA* de la manzana fresca (var. *Granny Smith*) fueron  $408.10 \pm 7.21$  mg GAE / 100 g producto (b.s.) y  $667.96 \pm 23.99$  mg TE / 100 g producto (b.s.), respectivamente. Los compuestos bioactivos del jugo de uva concentrado ( $69.1 \pm 1.0$  °Brix) fueron  $101.52 \pm 0.08$  mg de Malvidina-3,5-diglúcido / 100 g producto (b.s.),  $804.16 \pm 7.36$  mg de GAE / 100 g producto (b.s.), y  $709.50 \pm 10.10$  mg de TE / 100 g producto (b.s.) para *Mlv*, *TPC* y *AA*, respectivamente.

Todos los cubos de manzana impregnados aumentaron su contenido en *Mlv*. Los valores experimentales oscilaron entre 19.09 y 31.20 mg de Malvidina-3,5-diglucósido / 100 g producto (b.s.) Los valores de *TPC* fueron mayores ( $453.04 - 697.62$  mg GAE / 100g producto (b.s.)) que los de *Mlv* (**Tabla 3.3.3**). Las moléculas con valores de bajo peso molecular podrían penetrar fácilmente (Bialik *et al.*, 2018) en el tejido vía capilaridad a través de los tejidos de la manzana (Andrés *et al.*, 2019). Además, en este caso, los compuestos fenólicos de la manzana y la solución osmótica contribuyen al *TPC* del producto impregnado. Las antocianinas y otros compuestos fenólicos contribuyen al *AA* ( $815.41 - 979.52$  mg TE / 100 g de cubos de manzana (b.s.)).

El modelo obtenido para *Mlv* describe adecuadamente los datos experimentales ( $R^2 = 0.895$ , **Figura S4c**) (**Tabla 3.3.4**). Por el contrario, el modelo *TPC* no describió adecuadamente los datos experimentales ( $R^2 = 0.694$ , **Figura S4b**). Sin embargo, el mejor ajuste se observó para la *AA* ( $R^2 = 0.900$ , **Figura S4a**) (**Tabla 3.3.4**). La **Figura 3.3.4** muestra el comportamiento de cada compuesto bioactivo determinado para este trabajo. Los parámetros de tiempo y concentración, así como los tres coeficientes de interacción, fueron significativos ( $p \leq 0.05$ ) (**Tabla 3.3.4**) para el modelo *Mlv*. El aumento de la concentración de la solución osmótica y del tiempo de procesamiento mejoró la impregnación del *Mlv* en el cubo de manzana. Los valores de reducción de presión de 500 mmHg funcionaron bien cuando el tiempo de impregnación fue de 30 min y la concentración de 60 °Brix. Esto también pudo observarse en la **Figura 3.3.3**; la solución osmótica penetró en la parte interior del cubo de manzana. Los sitios más oscuros podrían indicar una alta concentración

de compuestos bioactivos. Al igual que los valores de *Mlv*, el *TPC* aumentó en los cubos de manzana impregnados en comparación con la cantidad original de manzana fresca. Varios autores han señalado que el proceso de impregnación al vacío permite obtener productos con mejores características nutricionales debido a la incorporación de compuestos bioactivos (Batista de Medeiros *et al.*, 2019; Bellary y Rastogi, 2016; Moreira y Almohaimeed, 2018; Mújica-Paz *et al.*, 2003a; Peng *et al.*, 2019; Xie y Zhao, 2003). El parámetro lineal de reducción de presión y el término cuadrático del tiempo fueron significativos ( $p \leq 0.10$ ) para el modelo *TPC*. Los valores más altos de *TPC* se alcanzaron con una reducción de presión de 500 mmHg y una concentración de 60 °Brix.

Por otro lado, se observa una reducción del *TPC* con tratamientos de 10 min y una mayor reducción de la presión. Moreira y Almohaimeed (2018) sugieren que la parte externa de las muestras está altamente concentrada con solutos del agente osmótico, y 10 min de tiempo del proceso no son suficientes para forzar su impregnación. Finalmente, todos los términos lineales, cuadráticos y de reducción de presión-concentración fueron significativos ( $p \leq 0.05$ ) para el modelo de *AA*. Los compuestos bioactivos y la *AA* mostraron un comportamiento similar. El aumento de la reducción de la presión induce la permeabilización y cambia el tejido (George *et al.*, 2016). Como se ha mencionado, la ampliación del tiempo de impregnación mejora la *SG*; en consecuencia, aumenta la concentración de compuestos bioactivos en el producto. Una de las principales ventajas de utilizar el jugo concentrado como agente osmótico es que se evita una pérdida significativa de componentes bioactivos en el producto impregnado. Algunos autores han informado de fugas de compuestos bioactivos al utilizar jugo o soluciones diluidas con compuestos bioactivos como agentes osmóticos en procesos de impregnación al vacío (Betoret *et al.*, 2012; González-Pérez *et al.*, 2021; Paśławska *et al.*, 2019).



**Figura 3.3.4** Efecto de la interacción reducción de la presión-concentración de la solución osmótica sobre (a) actividad antioxidante ( $AA = -134 - 0.126VP + 12.990t + 32.860C - 8.6E-4VP^2 - 0.280t^2 - 0.337C^2 + 0.016VPC$ ), (b) compuestos fenólicos totales ( $TPC = 1068.70 - 1.458VP - 28.48t - 3.4C + 0.485t^2 + 0.030VPt + 0.020VPC$ ), y (c) antocianinas monoméricas totales ( $Mlv = 36.60 - 0.055VP - 0.701t - 0.203C + 1.3E-3VPt + 6.0E-4VPC + 0.012tC$ ) en cubos de manzana impregnados con jugo de uva concentrado durante 20 min de procesamiento.

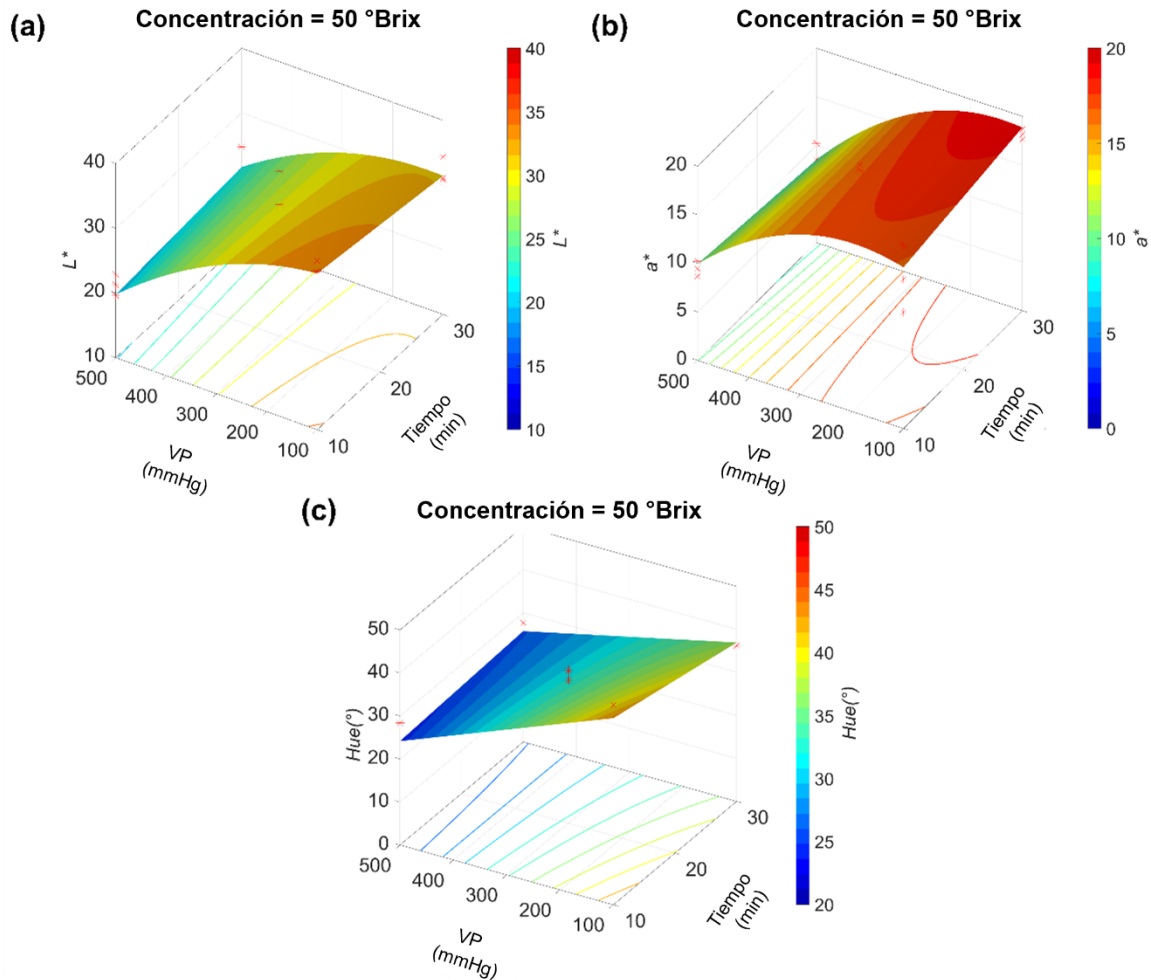
### 3.3.5 Influencia de las variables del proceso en los parámetros de color

Los valores de las coordenadas cromáticas de las manzanas frescas fueron  $L_0^* = 75.43 \pm 3.26$ ,  $a_0^* = -4.55 \pm 2.19$ ,  $b_0^* = 14.55 \pm 0.00$ , lo que corresponde a un matiz ( $^{\circ}Hue$ ) amarillo ( $106.32 \pm 0.00$ ), y una pureza ( $C^*$ ) de  $15.27 \pm 4.33$ . Los parámetros de color del jugo concentrado de uva fueron  $L^* = 22.77 \pm 1.27$ ,  $a^* = 12.62 \pm 1.43$ ,  $b^* = 3.92 \pm 0.26$ , con un  $^{\circ}Hue = 17.31 \pm 0.77$ , y un  $C^* = 13.21 \pm 1.44$ . La **Tabla 3.3.2** muestra los valores de los

parámetros de color de los cubos de manzana obtenidos tras el proceso de impregnación. En comparación con las muestras frescas, la reducción de la presión cambió significativamente ( $p \leq 0.05$ ) el color de los cubos de manzana impregnados. Los valores van de 19.79 a 36.19 para  $L^*$ , de 7.92 a 18.14 para  $a^*$ , de 3.69 a 16.04 para  $b^*$ , de 22.51 a 46.39 para  $^{\circ}Hue$ , de 7.64 a 22.75 para Croma ( $C^*$ ), y de 44.20 a 58.08 para la diferencia total de color ( $\Delta E$ ). Las tres coordenadas cromáticas evaluadas habían cambiado debido al proceso de impregnación. Los cubos de manzana impregnados finales tenían un color púrpura oscuro similar al color del jugo. Los modelos de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $^{\circ}Hue$ ,  $C^*$  y  $\Delta E$  se muestran en la **Tabla 3.3.4**. La reducción de la presión y la concentración afectaron significativamente a la luminosidad de los cubos de manzana (**Tabla 3.3.4**). Como se observa en la **Figura 3.3.5a**, los valores de  $L^*$  disminuyeron al disminuir la presión. La **Figura 3.3.3** muestra cómo la acumulación de solutos en los tejidos de la muestra aumentó con la reducción de la presión. En las presiones más bajas, el efecto (disminución de los valores de  $L^*$ ) sólo es evidente cuando el tiempo es más largo y la concentración es mayor. Para los valores de  $a^*$ , el principal efecto fue la reducción de la presión. Los modelos propuestos describieron adecuadamente la incorporación de compuestos coloreados (**Tabla 3.3.4**). El aumento de los valores de  $a^*$  en la manzana impregnada con zanahoria negra fue observado por Yilmaz y Ersus Bilek (2017). Observaron una interacción entre la presión y el tiempo. Este comportamiento afecta al  $^{\circ}Hue$  o matiz; el aumento de los compuestos coloreados cambia el matiz de las muestras. Las muestras cercanas a  $0^{\circ}$  en el espacio de color tienen un matiz rojizo-púrpura. Sin embargo, hay que tener en cuenta la saturación (pureza) del color. El aumento de la reducción de la presión (término significativo en el modelo, **Tabla 3.3.4**) hace que los cubos de manzana se acerquen al color  $b^*$ , probablemente debido a la impregnación de compuestos más absorbentes de la luz. La impregnación de estos compuestos provocó un cambio en la  $\Delta E$ ; principalmente, influenciado por la presión. Sin embargo, dado que estas mediciones de color representan el color externo de la fruta, el cambio en  $^{\circ}Hue$  podría representar mejor (**Figura 3.3.5c**) el efecto de los factores evaluados. Los valores más bajos del tono de color ( $^{\circ}Hue$ ) se asocian con mayores cambios netos de color y valores más bajos de  $a^*$  y  $b^*$ . Finalmente, los parámetros de color del agente osmótico no cambiaron significativamente durante el proceso osmótico. Algunos autores también informaron de esto con extractos de soluciones



de jugo de bayas de 22 °Brix. Los autores suponen que la inhibición del pardeamiento enzimático y oxidativo ocurre con los solutos de las soluciones (Francis y Markakis, 1989; Samborska *et al.*, 2019). Se recomienda una impregnación a temperaturas inferiores a 50 °C para evitar que la degradación del azúcar reaccione con las antocianinas y aumente su pérdida (Samborska *et al.*, 2019).



**Figura 3.3.5** Efecto de la interacción presión-reducción-tiempo sobre (a)  $L^*$  ( $L^* = 62.43 - 0.056VP - 0.194t - 0.527C - 7.2E-5 VP^2 + 5.8E-4 VPt + 0.001VPC$ ), (b)  $a^*$  ( $a^* = 11.76 + 0.037VP + 0.16t - 8.1E-5 VP^2 - 4.6E-4 VPt$ ), y (c) Matiz (°Hue) ( $Hue(°) = -21.97 - 0.113VP + 1.178t + 3.037C - 0.031 C^2 + 0.001 VPt + 0.001VPC - 0.032tC$ ) de cubos de manzana impregnados con jugo de uva concentrado. Los puntos corresponden a los datos experimentales.

### 3.4 Conclusiones

El nivel de reducción de presión y el tiempo de procesado afectaron a las características de impregnación de los cubos de manzana. La RSM describió con éxito el comportamiento de *WL*, *TSS*, color impregnado, incorporación de compuestos bioactivos y parámetros de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $^{\circ}Hue$ ,  $C^*$  y  $\Delta E$ ) utilizando concentrado de jugo de uva incorporado en cubos de manzana. La disminución de presión y el incremento del tiempo de proceso favoreció el aumento de los parámetros de transferencia de masa (*WL* y *SG*) y la impregnación de *TSS*, *AA*, *TPC* y *Mlv*. La metodología de análisis de imagen para analizar la impregnación de color permitió observar si la transferencia de masa fue homogénea en todo el tejido del producto o sólo se produce en la parte externa del mismo debido a la acumulación de solutos. Dicha acumulación puede estar relacionada con el oscurecimiento de la parte externa del producto. Por lo tanto, se recomienda reducir la presión hasta 500 mmHg para homogeneizar el color impregnado en el producto.

Además, las mayores cantidades de compuestos bioactivos y de impregnación de solutos se lograron utilizando una reducción de presión de 500 mmHg. Sin embargo, el tiempo de procesamiento aumentó significativamente la contracción y la deformación del producto debido a la disrupción celular generada por su deshidratación. Por lo tanto, se recomienda utilizar presiones de 500 mmHg y tiempos de proceso inferiores a 20 min para conseguir una impregnación significativa de los compuestos del jugo de uva y un producto sin grandes modificaciones morfométricas.

### Agradecimientos

Los autores González-Pérez y Jiménez-González agradecen el apoyo financiero para sus estudios de doctorado de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México.

### Referencias

- Ae, L., Mg, G., Ti, L., & Es, L. (2016). Kinetic Study of the Osmotic Pretreatment and Quality Evaluation of Traditional Greek Candied Pumpkin. *Food & Nutrition Journal*, 1(1). doi: 10.29011/2575-7091.100005
- Alam, Md. S., Kaur, M., & Ramya, H. G. (2019). Mass transfer kinetics for osmotic dehydration of kinnow fruit in sugar solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89(1), 361–370. doi: 10.1007/s40011-017-0951-z
- Allahdad, Z., Nasiri, M., Varidi, M., & Varidi, M. J. (2019). Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 244, 202–211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T., & Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 286–300. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.12.007
- Azuara, E., Beristain, C., & García, H. S. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food Science and Technology*, 29(4), 239–242.
- Barbosa de Lima, A. G., da Silva, J. V., Pereira, E. M. A., dos Santos, I. B., & de Lima, W. M. P. B. (2016). Drying of bioproducts: Quality and energy aspects. En J. M. P. Q. Delgado & A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (Vol. 63, pp. 1–18). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-19767-8\_1
- Bera, D., & Roy, L. (2015). Osmotic dehydration of litchi using sucrose solution: Effect of mass transfer. *Journal of Food Processing & Technology*, 06(07). doi: 10.4172/2157-7110.1000462
- Bozkir, H., Rayman Ergün, A., Serdar, E., Metin, G., & Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties

- of persimmon fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 135–141. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
- Brochier, B., Marczak, L. D. F., & Noreña, C. P. Z. (2015). Osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes: Water effective diffusivity evaluation. *Food and Bioprocess Technology*, 8(3), 623–636. doi: 10.1007/s11947-014-1432-5
- Calín-Sánchez, Á., Kharaghani, A., Lech, K., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Tsotsas, E. (2015). Drying Kinetics and Microstructural and Sensory Properties of Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as Affected by Drying Method. *Food and Bioprocess Technology*, 8(1), 63–74. doi: 10.1007/s11947-014-1383-x
- Cano-Lamadrid, M., Lech, K., Michalska, A., Wasilewska, M., Figiel, A., Wojdyło, A., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar Mollar de Elche. *Food Chemistry*, 232, 306–315. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.033
- Chitrakar, B., Zhang, M., & Adhikari, B. (2019). Dehydrated foods: Are they microbiologically safe? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2734–2745. doi: 10.1080/10408398.2018.1466265
- 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
- Cortez-Latorre, J. D., Faicán, M., Pirovani, M., & Piagentini, A. (2021). Improving fresh-cut apple quality and healthy potential-related attributes through mild vacuum impregnation process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(12), e15995. doi: 10.1111/jfpp.15995
- de Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., de Mendonça, K. S., Resende, N. S., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2017). Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 10–18. doi: 10.1016/j.ifset.2017.01.006
- Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., ... Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review. *Critical*

- Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(9), 1408–1432. doi: 10.1080/10408398.2017.1409192
- Dermesonlouoglou, E. K., Bimpilas, A., Andreou, V., Katsaros, G. J., Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2017). Process optimization and kinetic modeling of quality of fresh-cut strawberry cubes pretreated by high pressure and osmosis: High pressure and osmotic treatment of strawberries for shelf life extension. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), 1–14. doi: 10.1111/jfpp.13137
- Dermesonlouoglou, E. K., & Giannakourou, M. C. (2019). Evaluation and modelling of osmotic pre-treatment of peach using alternative agents in a multiple-component solution: Modelling osmotic pre-treatment of peach. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1240–1249. doi: 10.1002/jsfa.9296
- Derrickson-Tharrington, E., Kendall, P. A., & Sofos, J. N. (2005). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 during storage or drying of apple slices pretreated with acidic solutions. *International Journal of Food Microbiology*, 99(1), 79–89. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.07.015
- Dias da Silva, G., Barros, Z. M. P., de Medeiros, R. A. B., de Carvalho, C. B. O., Rupert Brandão, S. C., & Azoubel, P. M. (2016). Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *LWT*, 74, 114–119. doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.039
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L., & Xidieh Murr, F. E. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 267–274. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.016
- Faicán, M. A., Piagentini, A., Pirovani, M. É., Faicán, M. A., Piagentini, A., & Pirovani, M. É. (2022). Vacuum impregnation of fresh-cut apples with osmotic solutions containing honey. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 75(3), 10089–10100. doi: 10.15446/rfnam.v75n3.99558
- Fernando, W. J. N., Ahmad, A. L., Shukor, S. R. A., & Lok, Y. H. (2008). A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *Journal of Food Engineering*, 88(2), 229–238. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.02.008
- Garcia-Noguera, J., Oliveira, F. I. P., Weller, C. L., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2014). Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of

- freeze dried strawberries. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2222–2227. doi: 10.1007/s13197-012-0724-x
- González-Pérez, J.E., & López-Malo, A. (2022). Sensory evaluation of apple cubes (Granny Smith var.) impregnated with concentrated grape juice (Victoria var.) subjected to convection drying. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 9(54), 28–39.
- González-Pérez, J.E., López-Méndez, E. M., Luna-Guevara, J. J., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-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
- González-Pérez, J.E., López-Méndez, E. M., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-López, I. I. (2019). Mass transfer and morphometric characteristics of fresh and osmodehydrated white mushroom pilei during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 262, 181–188. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.06.017
- González-Pérez, J.E., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2021). Mass transfer during osmotic dehydration of fruits and vegetables: Process factors and non-thermal methods. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 344–374. doi: 10.1007/s12393-020-09276-3
- González-Pérez, Julio E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Guerrero-Beltrán, J. A., & López-Malo, A. (2022). Vacuum impregnation on apples with grape juice concentrate: Effects of pressure, processing time, and juice concentration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102981. doi: 10.1016/j.ifset.2022.102981
- Gulati, T., & Datta, A. K. (2015). Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, 166, 119–138. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031
- Kek, S. P., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2013). Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 495–506. doi: 10.1016/j.fbp.2013.05.003

- Kowalska, H., Marzec, A., Kowalska, J., Ciużyńska, A., Czajkowska, K., Cichowska, J., ... Lenart, A. (2017). Osmotic dehydration of Honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 500–505. doi: 10.1016/j.lwt.2017.03.044
- Kowalska, J., Kowalska, H., Marzec, A., Brzeziński, T., Samborska, K., & Lenart, A. (2018). Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 799–807. doi: 10.1007/s10068-018-0304-6
- Lech, K., Figiel, A., Michalska, A., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2018). The effect of selected fruit juice concentrates used as osmotic agents on the drying kinetics and chemical properties of vacuum-microwave drying of pumpkin. *Journal of Food Quality*, 2018, 1–11. doi: 10.1155/2018/7293932
- Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M., & Szarycz, M. (2015). Drying Kinetics and Bioactivity of Beetroot Slices Pretreated in Concentrated Chokeberry Juice and Dried with Vacuum Microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644–1653. doi: 10.1080/07373937.2015.1075209
- Luchese, C. L., Gurak, P. D., & Marczak, L. D. F. (2015). Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): Evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 1128–1136. doi: 10.1016/j.lwt.2015.04.060
- Martínez-Vera, C., & Vizcarra-Mendoza, M. G. (2022). Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach. *Biosystems Engineering*, 218, 256–273. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.04.016
- Mokhtarian, M., Heydari Majd, M., Koushki, F., Bakhshabadi, H., Daraei Garmakhany, A., & Rashidzadeh, S. (2014). Optimization of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 6(2), 201–214. doi: 10.3920/QAS2012.0121
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E., & Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation properties of some fruits at vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*, 56(4), 307–314. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00155-3

- Muñiz-Becerá, S., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2017). Solute transfer in osmotic dehydration of vegetable foods: A review: solute transfer in osmotic dehydration. *Journal of Food Science*, 82(10), 2251–2259. doi: 10.1111/1750-3841.13857
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Tappi, S., Siroli, L., Lanciotti, R., Romani, S., & Witrowa-Rajchert, D. (2018). Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): Study on quality parameters evolution during storage. *Food Control*, 93, 40–47. doi: 10.1016/j.foodcont.2018.05.005
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K., & Figiel, A. (2015a). Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried sour cherry fruits pre-dehydrated in fruit concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 8(10), 2076–2095. doi: 10.1007/s11947-015-1561-5
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K., & Figiel, A. (2015b). Influence of osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 824–836. doi: 10.1007/s11947-014-1447-y
- Osaie, R., Zhou, C., Xu, B., Tchabo, W., Tahir, H. E., Mustapha, A. T., & Ma, H. (2019). Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices. *Journal of Food Biochemistry*, 43(5), 1–14. doi: 10.1111/jfbc.12832
- Pacheco-Angulo, H., Herman-Lara, E., García-Alvarado, M. A., & Ruiz-López, I. I. (2016). Mass transfer modeling in osmotic dehydration: Equilibrium characteristics and process dynamics under variable solution concentration and convective boundary. *Food and Bioprocess Technology*, 97, 88–99. doi: 10.1016/j.fbp.2015.11.002
- Pei, F., Xiao, K., Chen, L., Yang, W., Zhao, L., Fang, Y., ... Hu, Q. (2019). Mass transfer characteristics during ultrasound-assisted osmotic dehydration of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2213–2223. doi: 10.1007/s13197-019-03707-8



- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216–1217. doi: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x
- Qiu, L., Zhang, M., Tang, J., Adhikari, 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
- Rahman, M. S. (2017). State diagram of foods and Its importance to food stability during storage and processing. En J. Ahmed (Ed.), *Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials* (pp. 251–260). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9781118935682.ch11
- Rahman M, S. M. A. (2015). Osmotic dehydration of pumpkin using response surface methodology -influences of operating conditions on water loss and solute gain. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 05(05). doi: 10.4172/2155-9821.1000226
- Rongtong, B., Suwonsichon, T., Ritthiruangdej, P., & Kasemsumran, S. (2018). Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. *Agriculture and Natural Resources*, 52(6), 557–564. doi: 10.1016/j.anres.2018.11.023
- Samborska, K., Eliasson, L., Marzec, A., Kowalska, J., Piotrowski, D., Lenart, A., & Kowalska, H. (2019). The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extract to sugar solution on osmotic dehydration and sensory properties of apples. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1927–1938. doi: 10.1007/s13197-019-03658-0
- Sangeeta, & Hathan, B. S. (2016). Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam (*Amorphophallus* spp.) during osmotic dehydration in sodium chloride solution: Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3), 521–530. doi: 10.1111/jfpp.12631
- Sethi, K., & Kaur, M. (2019). Effect of osmotic dehydration on physicochemical properties of pineapple using honey, sucrose and honey-sucrose solutions. *International*

- 
- Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 6257–6262. doi: 10.35940/ijeat.A2026.109119
- Shamaei, S., Emam-Djomeh, Z., & Moini, S. (2012). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: Effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties: ultrasound-osmotic dehydration of cranberry. *Journal of Texture Studies*, 43(2), 133–141. doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x
- Sucheta, Chaturvedi, K., & Yadav, S. K. (2019). Ultrasonication assisted salt-spices impregnation in black carrots to attain anthocyanins stability, quality retention and antimicrobial efficacy on hot-air convective drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104661. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104661
- Tiroutchelvame, D., Sivakumar, V., & Maran, P. (2015). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of amla (*Emblica officinalis* L.) cubes in sugar solution. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(4), 547–559. doi: 10.2298/CICEQ140712011T
- Yilmaz, F. M., & Ersus Bilek, S. (2018). Ultrasound-assisted vacuum impregnation on the fortification of fresh-cut apple with calcium and black carrot phenolics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 509–516. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.07.007
- Zhao, Y., & Xie, J. (2004). Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(9), 434–451. doi: 10.1016/j.tifs.2004.01.008

## CAPÍTULO 4

### Uso de un modelo de tiempo de falla para predecir la vida útil de manzana liofilizada previamente impregnada con jugo concentrado de zanahoria

Julio E. González-Pérez; Oscar Jiménez-González; Nelly Ramírez-Corona; Aurelio López-Malo

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

#### *Resumen*

El objetivo de este proyecto fue predecir mediante un modelo de tiempo de falla (TTFM) la vida útil de manzana liofilizada previamente impregnada con jugo concentrado de zanahoria (CJC). En la etapa de impregnación por vacío (51 mmHg, 40 °C, 30 min) se analizaron 7 diferentes variedades de manzana y la concentración de CJC. La maximización de la impregnación de carotenoides totales (TC), el sabor y la tinción de tejido impregnado (TI) mediante un modelo lineal general ( $R^2 > 0.978$ ) arrojó que la variedad *Pink Lady* y 20 °Brix de CJC tuvieron los mejores resultados ( $TC = 12.30 \pm 0.48$  mg  $\beta$ -caroteno / 100 g producto (en base seca, b.s.), una evaluación de sabor cercana a “me gusta en extremo” y una TI homogénea). Posteriormente la muestra fue liofilizada (-40 °C y  $P_{abs} = 0.0998$  mmHg) y almacenada bajo condiciones de vida acelerada. Las condiciones evaluadas fue la permeabilidad del empaque ( $P = 2.17 \times 10^{-15}$  y  $1.04 \times 10^{-6}$  g / s Pa m), la temperatura ( $T = 15, 25$  y  $35$  °C) y la humedad relativa ( $RH \% = 0, 32.5$  y  $75$  %). El TTFM permitió predecir la vida útil de las muestras con  $R^2 > 0.800$ . El modelo arrojó que no se encontraban fallas a  $TTF > 105$  días bajo las siguientes condiciones: a  $RH < 35$  %, independiente mente de la  $T$  se observaron productos sensorialmente aceptables en texturas (dureza  $> 18.14$  N); a  $RH < 35$  % y  $T = 15$  °C se mantenían los  $TC > 0.81$  mg  $\beta$ -caroteno / 100 g producto (b.s.), y a  $T = 15$  °C y  $RH = 35$  %, el valor de la diferencia neta de color del producto respecto al día cero de almacenamiento se mantenía  $< 5$  %.

**Palabras clave:** impregnación al vacío, carotenoides totales, variedades de manzana, almacenamiento, dureza.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

El uso de jugo de manzana como solución osmótica fue adecuado para osmodeshidratar cubos de manzana, ya que este tuvo una transferencia de masa muy similar a soluciones osmóticas convencionales (soluciones de sacarosa). El uso de análisis de imagen fue adecuado para analizar la evolución del volumen y la deformación de los cubos de fruta durante el proceso. Las curvas de proceso de transferencia de masa durante la osmodeshidratación de manzana en jugo concentrado de manzana fueron descritas satisfactoriamente con modelos de equilibrio (Modelo de Azuara), con la segunda ley de Fick y con un modelo dinámico (Modelo de Luenberger). Los resultados estimados con el modelo de Azuara concuerdan con los estimados experimentalmente. En el caso del modelo de la segunda ley de Fick requirió considerar el volumen real de la matriz alimenticia para mejorar el ajuste y evitar sobreestimaciones del parámetro de difusividad de agua y solutos. El modelo de Luenberger permitió estimar la tasa específica de transferencia de solutos durante todo el proceso. Esto permitió estimar el momento exacto en que la transferencia de solutos alcanza el estado de equilibrio.

La incorporación de solutos de jugo de uva en cubos de manzana puede realizarse implementando impregnación con vacío. La presión de vacío, el tiempo de inmersión y la concentración de jugo concentrado de uva *Victoria* son parámetros de proceso adecuados para monitorear la impregnación de cubos de manzana. Asimismo, el uso de una metodología superficie de respuesta fue adecuado para estimar condiciones óptimas de proceso que permitan incrementar la pérdida de agua, la ganancia de solutos, la cantidad de sólidos solubles totales, y la cantidad de compuestos bioactivos. Por otro lado, el uso de análisis de imagen para evaluar la tinción del tejido de la matriz alimenticia fue adecuado para determinar si la impregnación de jugo había sido homogénea o no. Cuando la impregnación es heterogénea, la velocidad de transferencia de masa se ve reducida debido a la acumulación de solutos sobre la superficie de la matriz alimenticia. Una impregnación homogénea se alcanza a presiones de vacío de 500 mmHg y tiempos de inmersión inferiores a 20 min. Por otro lado, se recomienda la aplicación de una evaluación sensorial para analizar si la cantidad de jugo impregnado mediante vacío es sensorialmente aceptable

o se requiere de un procedimiento de osmodeshidratación para incrementar la ganancia de solutos.

El análisis de componentes principales permitió dilucidar el efecto de diferentes variedades de manzana y concentraciones de jugo de zanahoria sobre la calidad de manzana impregnada. El modelo de tiempo de falla permitió predecir la vida útil de manzana liofilizada previamente impregnada cuando se almacena en diferentes empaques y bajo distintas condiciones de humedad relativa y temperatura.

Las matrices alimenticias osmodeshidratado e impregnadas en este trabajo de tesis tienen una actividad de agua elevada por lo que se recomienda para trabajos futuros aplicar un tratamiento de secado para incrementar su vida de anaquel. Además, se recomienda un análisis de la estabilidad composicional, textura, características fisicoquímicas y sensoriales, durante el almacenamiento de las muestras obtenidas utilizando gas inerte para reducir la degradación por reacciones de oxidación.

Los resultados de este trabajo muestran que es posible utilizar jugos concentrados de frutas y hortalizas como soluciones osmóticas, lo cual permite explorar un sinnúmero de posibilidades para desarrollar productos enriquecidos/fortificados con compuestos bioactivos.

## EVIDENCIA DE PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS Y PUBLICACIONES

En esta sección se presenta la evidencia de participación en congresos y publicación de artículos de investigación y de revisión, desarrollados durante el doctorado y productos de este trabajo de tesis. Además, se presentan algunos trabajos que fueron aceptados para su presentación en futuros congresos y se muestran algunos trabajos que están en revisión por pares para su futura publicación en revistas internacionales indexadas.

### Congresos

Las evidencias de los trabajos presentados (modalidad oral y póster) y aceptados en congresos nacionales e internacionales fueron los siguientes:

#### *Presentaciones en modalidad oral*

1. **González-Pérez, J.E.**, López-Malo, A. 2020. “Sensory evaluation of apple cubes (*Granny Smith* var.) impregnated with grape juice concentrated (*Victoria* var.) subjected to convection drying”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Oral.
2. **González-Pérez, J.E.**, Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modelación dinámica de un proceso de deshidratación osmótica de manzana mediante un Observador de Luenberger”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Oral.
3. **González-Pérez, J.E.**, Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modeling of drying kinetics of fresh and osmodehydrated apples during convective drying”, 4° Coloquio Tecnología, Ciencia y Cultura: una visión global, Presentación oral, Puebla, Puebla.

#### *Datos relevantes de las presentaciones*

El trabajo 1 fue seleccionado y publicado en la edición especial e-Latin Food 2020, 9th *Food Science, Biotechnology and Safety Congress* de la revista *RIIT* y el trabajo 3 fue seleccionado y publicado en la edición especial *IntechOpen - Technology, Science and Culture - A Global Vision, Volume IV*.

1. **González-Pérez, J.E., López-Malo, A.** 2020. “Sensory evaluation of apple cubes (*Granny Smith* var.) impregnated with grape juice concentrated (*Victoria* var.) subjected to convection drying”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Oral.





## PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS (MODALIDAD ORAL)

1. **González-Pérez, J.E., López-Malo, A.** 2020. “Sensory evaluation of apple cubes (*Granny Smith* var.) impregnated with grape juice concentrated (*Victoria* var.) subjected to convection drying”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Oral.



2. **González-Pérez, J.E.**, Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modelación dinámica de un proceso de deshidratación osmótica de manzana mediante un Observador de Luenberger”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Oral.



**La Academia Mexicana de Investigación y Docencia  
en Ingeniería Química (AMIDIQ)**

otorga el presente

**RECONOCIMIENTO**

a:

Julio Emmanuel González-Pérez, Aarón Romo-Hernández, Nelly Ramírez-Corona, Aurelio López-Malo

**Por la presentación del trabajo en modalidad oral:**

**MODELACIÓN DINÁMICA DE UN PROCESO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE  
MANZANA MEDIANTE UN OBSERVADOR DE LUENBERGER**

  
Dra. María del Rosario Enriquez Rosado  
PRESIDENTA DEL AMIDIQ DEL COMITÉ ORGANIZADOR

  
Dr. Tomás Viveros García  
PRESIDENTE DEL COMITÉ TÉCNICO

ID: 118

Evento virtual del 08 al 11 de septiembre de 2021

3. **González-Pérez, J.E.**, Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modeling of drying kinetics of fresh and osmodehydrated apples during convective drying”, 4º Coloquio Tecnología, Ciencia y Cultura: una visión global, Presentación oral, Puebla, Puebla.

# UDLAP<sup>®</sup>

## **Universidad de las Américas Puebla**

a través del Decanato y la Dirección de Investigación y Posgrado,  
otorga la presente constancia a

**Julio Emmanuel González Pérez**

por su participación en el  
4º Coloquio Tecnología, Ciencia y  
Cultura: una visión global

  
**Dr. Martín Alejandro Serrano Meneses**  
Decano de Investigación y Posgrado

  
**Dr. Luis Ricardo Hernández**  
Director de Investigación y Posgrado

Otorgado en la Ex hacienda Santa Catarina Mártir, San Andrés Cholula, Puebla, a los diecinueve días del mes de noviembre de dos mil veintiuno.

## PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS (MODALIDAD ORAL)

3. **González-Pérez, J.E.**, Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. "Modeling of drying kinetics of fresh and osmodehydrated apples during convective drying", 4° Coloquio Tecnología, Ciencia y Cultura: una visión global, Presentación oral, Puebla, Puebla.

**UDLAP**

San Andrés Cholula, Puebla a, 1 de febrero de 2022.

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS, PUEBLA**

Ex Hacienda Santa Catarina Mártir, s/n, C.P. 72810

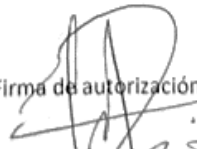
San Andrés Cholula, Puebla

P R E S E N T E

El (la) que suscribe, **Julio Emmanuel González Pérez**, por mi propio derecho y en pleno uso y goce de mis derechos civiles, por este medio manifiesto bajo protesta de decir verdad, que participaré como ponente en el **Cuarto Coloquio de Doctorados, Tecnología, Ciencia y Cultura: Una Visión Global** a celebrarse el día 19 de noviembre de 2021, en modo online, por lo que en este acto manifiesto expresamente mi consentimiento para que la UDLAP pueda utilizar, por sí misma y/o a través de terceros las fotografías, grabaciones en audio, video, opinión, comentarios, en las que participe, obtenidas en el marco del evento ya mencionado, y mediante el presente acto, otorgo licencia de uso no exclusivo y gratuito, a la UDLAP del texto que, bajo protesta de decir verdad es de mi autoría primigenia para que publique mi ponencia escrita en formatos físicos o electrónicos incluido internet o en los medios que la UDLAP considere convenientes o con terceros con los que UDLAP tenga contratados dichos servicios, la cual hasta el momento no ha sido publicada por alguna revista o cualquier otro medio, respondiendo en todo momento por cualquier acción de reivindicación, derechos de autor, plagio u otra clase de reclamación que al respecto pudiere surgir, obligándome a sacar en paz y a salvo a la UDLAP de cualquier supuesto mencionado en el presente documento.

Manifiesto, además, que no existe impedimento de ninguna naturaleza para la firma de la presente, por lo que no media error, dolo, mala fe, ni cualquier otro vicio del consentimiento.

Firma de autorización

  
Nombre y firma

### ***Presentación en modalidad póster***

- 1. González-Pérez, J.E.,** Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modelación dinámica de un proceso de osmodeshidratación de manzana mediante un observador de Luenberger”, Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering. Poster.
- 2. González-Pérez, J.,** López-Malo, A., Ramírez-Corona, N., Romo-Hernández, A. 2021. “An Observer-Based Methodology for Estimating Effective Diffusion Coefficients during Osmodehydration of Apple Cubes”, AIChE Annual Meeting, Boston. USA.
- 3. González-Pérez, J.E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Romo-Hernández, A., López-Malo, A. 2021. “Dynamic estimation of water and solutes diffusivity coefficient during vacuum-assisted osmodehydration of apple with grape juice”, Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering. Poster.
- 4. González-Pérez, J.E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. “Determinación de los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos en la osmodeshidratación de manzana con jugo de uva”, XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster.
- 5. González-Pérez, J.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. “Optimization of the vacuum impregnation of beta-carotene in jicama with carrot juice”, Latin Food 2022. Poster.
- 6. González-Pérez, J.E.,** López-Malo, A. 2022. “Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate”, Latin Food 2022. Poster.

### **Datos relevantes de las presentaciones**

El trabajo 6 ganó el primer lugar en el concurso de carteles del área de *Emerging Technologies and Food Preservation*. Asimismo, este trabajo fue seleccionado para su posible publicación en el *Special Issue* del “Latin Food 2022: The *Food Science, Biotechnology and Safety Congress*” de la revista *Food Research International*.

1. **González-Pérez, J.E.**, Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modelación dinámica de un proceso de osmodeshidratación de manzana mediante un observador de Luenberger”, Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering. Poster.

Twitter Latin American Conference EnvChemPSE

July 1<sup>st</sup>, 2021, Aguascalientes, México

ELSEVIER

# Certificate

This is to certify that the poster

## Modelación dinámica de un proceso de osmodeshidratación de manzana mediante un observador de Luenberger

J.E. González-Pérez, A. Romo-Hernández, N. Ramírez-Corona, A. López-Malo

has been presented in the Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering #LatinEnvChemPSE.

Prof. Adrián Bonilla-Petriciolet

Chairman of the Organizing Committee of #LatinEnvChemPSE

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Aguascalientes

2. **González-Pérez, J., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N., Romo-Hernández, A. 2021.**  
“An Observer-Based Methodology for Estimating Effective Diffusion Coefficients during Osmodehydration of Apple Cubes”, AIChE Annual Meeting, Boston. USA.



**AMERICAN INSTITUTE OF  
CHEMICAL ENGINEERS**

120 WALL STREET, 23 FL.  
NEW YORK, NY  
10005 USA

To Whom It May Concern:

The American Institute of Chemical Engineers (AIChE) with more than 60,000 members from over 110 countries is the premiere professional society for chemical engineering. AIChE would like to thank you for attending the 2021 AIChE Annual Meeting, held virtually and in-person at the John B. Hynes Veterans Memorial Convention Center, Sheraton Boston, and Marriott Boston Copley Place. The conference formally ran from November 7-19, 2021 with the first half being held in-person and the second half being held virtually.

This letter confirms that Julio González-Pérez presented the following paper in the session Poster Session: Food, Pharmaceuticals, and Bioengineering Division - Virtual on Tuesday, November 16, 2021:

"An Observer-Based Methodology for Estimating Effective Diffusion Coefficients during Osmodehydration of Apple Cubes"

The technical program can be found at the following page:  
<https://aiche.confex.com/aiche/2021/meetingapp.cgi>

The AIChE Annual Meeting is accomplished by participation of all who attend the conference. The above participations were beneficial and invaluable to the meeting and the dissemination of knowledge. We are pleased that you have joined us. Should you require additional information, please do not hesitate to contact me.


Thank you very much.

Regards,

A handwritten signature in black ink that reads "Stéphanie Orvoine-Couvrette". The signature is written in a cursive, flowing style.

Stéphanie Orvoine-Couvrette  
Associate Director, Program Development  
American Institute of Chemical Engineers  
120 Wall Street, 23rd Floor  
New York, NY 10005  
[programming@aiche.org](mailto:programming@aiche.org)

2. **González-Pérez, J.**, López-Malo, A., Ramírez-Corona, N., Romo-Hernández, A. 2021. “An Observer-Based Methodology for Estimating Effective Diffusion Coefficients during Osmodehydration of Apple Cubes”, AIChE Annual Meeting, Boston. USA.

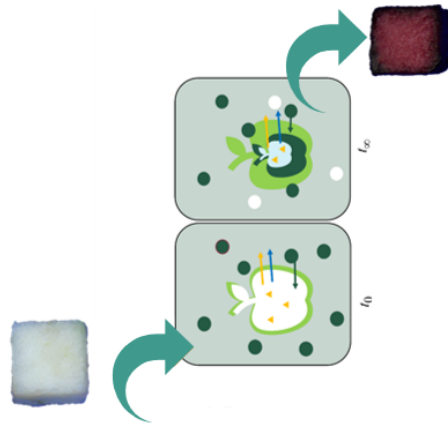


**An Observer-Based Methodology  
for Estimating Effective Diffusion  
Coefficients during Osmodehydration  
of Apple Cubes**

González-Pérez, Julio E., López-Malo, Aurelio\*, Ramírez-Corona, Nelly,  
Romo-Hernández, Aaron

Universidad de las Américas Puebla,  
San Andrés Cholula, Puebla, Mexico  
\*aurelio.lopezm@udlap.mx

**UDLAP**®





3. **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Romo-Hernández, A., López-Malo, A. 2021. “Dynamic estimation of water and solutes diffusivity coefficient during vacuum-assisted osmodehydration of apple with grape juice”, Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering. Poster.



**July 21st, 2022**

**This is to certify that the poster**

**Dynamic estimation of water and solutes diffusivity coefficient during vacuum-assisted osmodehydration of apple with grape juice**

**González Pérez, J. E., Jiménez González, O., Ramírez Corona, N., Romo Hernández, A., López Malo, A.**

**has been presented in the 2022 Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering #LatinEnvChemPSE.**



**Prof. Adrián Bonilla-Petriciolet**

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE AGUASCALIENTES

**Chairman of the Organizing Committee of #LatinEnvChemPSE**



Instituto **Tecnológico**  
de Aguascalientes

3. **González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Romo-Hernández, A., López-Malo, A.** 2021. "Dynamic estimation of water and solutes diffusivity coefficient during vacuum-assisted osmodehydration of apple with grape juice", Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering, Poster.

**Dynamic estimation of water and solutes diffusivity coefficient during vacuum-assisted osmodehydration of apple with grape juice**

González-Pérez, J. E.\*, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Romo-Hernández, A., López-Malo, A.

[julio.gonzalezpz@udlap.mx](mailto:julio.gonzalezpz@udlap.mx)

Twitter Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering

**UDLAP**

**Introduction**

Vacuum-assisted osmodehydration (VOD) is a pre-drying method used to increase the solute gain. This method reduces crust formation during convective drying and increases water removal during drying of impregnated fruits and vegetables.

During osmodehydration (OD), simultaneous mass fluxes such as water loss (WL) and solute gain (SG) are observed. This process can be described by means of Fick's second and diffusion (Kowalska et al., 2020) methodologies based on state estimators that have been recently explored for describing more accurately those fluxes, as well as the time required to achieve the equilibrium (steady-state) (Martínez-Vera et al., 2010).

The aim of this work was to develop an observer-based methodology to estimate the dynamic behavior of ED coefficients during apple VOD.

**Methods**

**VOD experiment**

**Estimating Diffusion coefficients using a Luenberger observer**

(González-Pérez et al., 2021)

Crank's analytical solution (cubic geometry):

$$\psi_j = v \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{[2n+1]^2} \exp[-(2n+1)^2 \delta_j \tau_j]$$

with the dimensionless parameters (Martínez-Vera et al., 2010):

$$\tau_{e,j} = \frac{D_j \delta_j t}{L^2} \quad \psi_j = 1 - \frac{F_{j,water}}{F_{j,water} + WL \text{ or } SG} \quad \delta_j = \left( \frac{D_j}{L^2} \right)$$

$F_{j,water}$  or solutes,  $D_j = 1 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, the equilibrium conditions were experimentally determined.

Equation system to estimate  $\delta$  behavior (Martínez-Vera et al., 2010):

$$\frac{d\psi_j}{dt_{e,j}} = -\delta_j \psi_j + \omega_j (\psi_j - \hat{\psi}_j)$$

Structure of Luenberger observer (Dochain et al., 2008)

$$\frac{d\hat{\psi}_j}{dt_{e,j}} = -\delta_j \hat{\psi}_j + \omega_j (\psi_j - \hat{\psi}_j)$$

Tuning parameters

$$\lambda_j^2 \quad \omega_j = -2\lambda_j - \delta_j$$

Solution

Runge-Kutta method (ode45, MatlabR2020b)

Tuning parameters and estimation error were minimized to ensure that observer converges locally to zero according to:

$$\text{Total error} = \sum_{k=1}^N [\hat{C}_{s,t} - C_{s,t}]^2 + \sum_{k=1}^N [\hat{k}_{t+1} - k_{t+1}]^2$$

Convergence error

**Results**

The obtained results showed that equilibrium conditions were reached at  $t > 1080$  min when osmotic solution and product  $a_w$  did not present significant differences ( $p > 0.05$ ) ( $a_w = 0.905$  and  $0.858$  for 50 and 60°Brix solutions, respectively) (Figure 1).

The equilibrium parameters of WL and SG were 0.54-0.66 g water/ g fresh product and 0.095-0.107 g solutes/ g fresh product, respectively (Figure 1).

**Conclusions**

The estimation of the dynamic parameters of effective diffusivity allowed to obtain better adjustments of the kinetics of the vacuum assisted osmodehydration process in comparison with fixed parameters.

**Acknowledgments**

González-Pérez gratefully acknowledge financial support for their Ph.D. studies from Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) and the National Council for Science and Technology (CONACYT) of Mexico

**References**

Dochain, D. (Ed.). (2008). *Bioprocess control*. Hoboken, NJ: Wiley.

González-Pérez, J. E., et al. (2021). Mass transfer during osmotic dehydration of fruits and vegetables: Process factors and non-thermal methods. *Food Engineering Reviews*, 13, 344-374.

Kowalska, H. et al. (2020). The impact of using polyols as osmotic agents on mass exchange during osmotic dehydration and their content in osmodehydrated and dried apples. *Drying Technology*, 38, 1120.

Martínez-Vera, C. et al. (2010). Apparent diffusion model assessment in extraction processes by means of a Luenberger observer. *Journal of Food Engineering*, 101, 16-22.

**Figure 2. Tuning of the Luenberger observer-based estimator for different values of  $\lambda$  during vacuum assisted osmotic dehydration of apple cubes using 50°Brix of grape concentrate at 40°C.**

a. Evolution of water loss during dimensionless time. b. Dynamic behavior of normalized parameter of diffusion. c. Optimization of Crank's analytical simplified solution (Table 1).


Overall, the observer solution presented a better fitness than that obtained by Crank's analytical simplified solution (Table 1). Estimator based on Luenberger observer for  $\lambda = 80$  and analytical solution.

$C_p^{50}$ (°Brix)	Luenberger observer			Analytical solution		
	Convergence error	Noise error	Total error	$R^2$	$D_j \times 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)	$R^2$
$J = \text{water}$						
50	2.43	0.312	0.008	0.320	0.930	0.880
60	2.31	0.277	0.005	0.282	0.930	0.880
$J = \text{solute}$						
50	2.34	0.198	2.483	2.681	0.988	0.849
60	2.12	0.159	2.411	2.570	0.958	0.840

**Figure 1. Mass transfer kinetics of apple cubes subjected to vacuum assisted osmodehydration with grape juice.**

4. **González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A.** 2022. “Determinación de los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos en la osmodeshidratación de manzana con jugo de uva”, XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster.

**AMIDIQ**  
Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.



XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ  
“La Ingeniería Química,  
la Sostenibilidad y la Economía Circular”

La Academia Mexicana de Investigación y Docencia  
en Ingeniería Química A.C.

otorga el presente

**RECONOCIMIENTO**

a:


**Julio Emmanuel González-Pérez, Oscar Jiménez-González, Nelly Ramírez-Corona, Aurelio López-Malo**

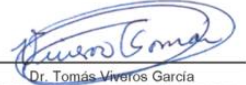
**Por la presentación del trabajo en modalidad cartel:**

**DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD DE COMPUESTOS BIOACTIVOS EN LA  
OSMODESHIDRATACIÓN DE MANZANA CON JUGO DE UVA**

ID: 88

XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ  
Puerto Vallarta, Jal., México. 23 al 26 de agosto de 2022

  
Dr. Jorge Ramón Robledo Ortiz  
PRESIDENTE DE LA AMIDIQ Y DEL COMITÉ ORGANIZADOR

  
Dr. Tomás Viveros García  
PRESIDENTE DEL COMITÉ TÉCNICO

4. **González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A.** 2022. "Determinación de los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos en la osmodeshidratación de manzana con jugo de uva", XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster.

**UDLAP** | UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

**Determinación de los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos en la osmodeshidratación de manzana con jugo de uva**


**González-Pérez, Julio E., Jiménez-González, Oscar, Ramírez-Corona, Nelly, López-Malo, Aurelio** | [jourcio.lopez@udlap.mx](mailto:jourcio.lopez@udlap.mx)

### Introducción

Uno de los métodos para la elaboración de alimentos funcionales a base de frutas es utilizar la osmodeshidratación. Este proceso de transferencia de masa ocurre cuando una matriz sólida sumergida en una solución hipertónica gana solutos y pierde agua mediante difusión [1-3]. Dicha transferencia de masa ha sido modelada con la segunda ley de Fick. La mayoría de los estudios que utilizan la segunda ley de Fick describen únicamente la difusión de solutos y agua [2]; sin embargo, son muy pocos los que contemplan la transferencia de masa de los compuestos bioactivos [4], a pesar de la importancia que estos representan para el producto final.

**El objetivo de este trabajo fue determinar los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos durante la osmodeshidratación de manzana sumergida en jugo de uva a diferentes concentraciones.**

### Metodología



**Proceso de osmodeshidratación 40 °C; Concentración del jugo de uva: 40, 50 y 60 °Brix; 10 g jugo / g manzana Granny Smith; triplicado**

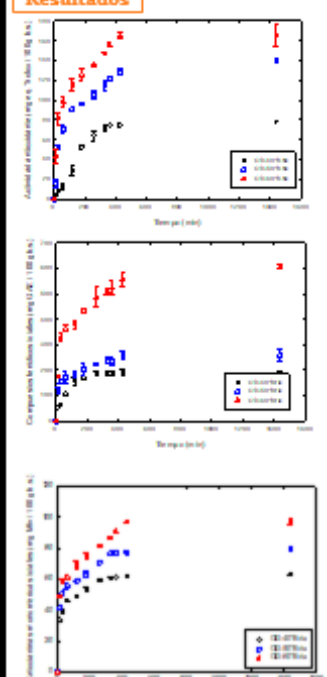
Todos los experimentos se realizaron por triplicado. Finalmente, se utilizó la solución analítica de Crank para determinar el coeficiente de transferencia de masa de cada componente analizado (agua, sólidos AA, CFT y AMT) en una muestra cúbica:

$$\ln(\Psi) = -\frac{3\pi^2 D}{4L^2} t + \ln\left(\frac{C_0}{C_\infty}\right); \text{pendiente} = -\frac{3\pi^2 D}{4L^2} \quad (1)$$

considerando D, coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s); L, la mitad del espesor de la muestra (m) y Ψ como:

$$\Psi = 1 - \left(\frac{\text{Cantidad de sustancia al tiempo } t}{\text{Cantidad de sustancia al tiempo en equilibrio}}\right) \quad (2)$$

### Resultados



**Figura 1.** Evolución de la impregnación de AA, CFT y AMT en manzana durante el proceso de osmodeshidratación con jugo de uva.

Independientemente de la concentración, todas las muestras se tiñeron por completo en el estado de equilibrio osmótico (p<0.05, Figura 1).

Únicamente los valores de D para antocianinas disminuyeron por el aumento de la concentración, esto puede deberse a la viscosidad de la mezcla, ya que entre mayor concentración mayor viscosidad, lo que impide la transferencia de moléculas de mayor tamaño como antocianinas-azúcar, a diferencia de otros compuestos fenólicos de menor tamaño. En el caso de los valores de D para agua, sólidos, AA y CFT mostraron un aumento debido al incremento de la concentración del agente osmótico. El incremento de la concentración de agente osmótico incrementó (p < 0.05) el tiempo de proceso debido a que la saturación del soluto impregnado sobre la superficie del producto redujo la velocidad de impregnación de solutos (Figura 2).

Componente analizado	C	Condición de equilibrio <sup>a</sup>	D × 10 <sup>10</sup> (m <sup>2</sup> / s) <sup>b</sup>	R <sup>2</sup>
Agua	40°Brix	0.44±0.15	2.82±0.32	0.949
	50°Brix	0.52±0.20	3.57±0.40	0.954
	60°Brix	0.65±0.02	4.53±0.48	0.963
Sólidos	40°Brix	0.082±0.006	0.48±0.06	0.884
	50°Brix	0.095±0.004	1.54±0.05	0.800
	60°Brix	0.105±0.003	2.26±0.08	0.800
Actividad Antioxidante	40°Brix	129.5±11.5	1.31±0.71	0.800
	50°Brix	130.3±6.7	2.93±0.62	0.837
	60°Brix	146.5±8.9	3.82±0.10	0.883
Compuestos Fenólicos Totales	40°Brix	190.2±1.1	2.79±0.70	0.858
	50°Brix	258.4±40.6	3.10±0.20	0.898
	60°Brix	605.9±101.7	3.46±0.10	0.826
Antocianinas Monoméricas Totales	40°Brix	62.8±4.4	6.85±0.50	0.987
	50°Brix	79.1±8.8	5.91±0.80	0.961
	60°Brix	96.8±0.0	4.29±0.80	0.948

<sup>a</sup>PAe (g/g), GSe (g/g), AAe (mg equivalentes de Trolox/100g b.s.), CDTe (mg equivalentes de ácido gálico/100g b.s.), AMTe (mg equivalentes de malvidina-3,5-diglucosido/100g b.s.). <sup>b</sup> Desviación estándar considerando un intervalo de confianza del 95%.

### Conclusiones

El modelo difusivo permitió describir adecuadamente la PA, GS, AA, CFT y AMT. Los valores de los parámetros de difusividad de AMT disminuyeron con el aumento de la concentración del agente osmótico. En el caso de las otras transferencias de masa analizadas se observó que las difusividades incrementaron por el aumento de la concentración.

### Agradecimientos

El autor González-Pérez agradece el apoyo financiero para sus estudios de doctorado de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México.

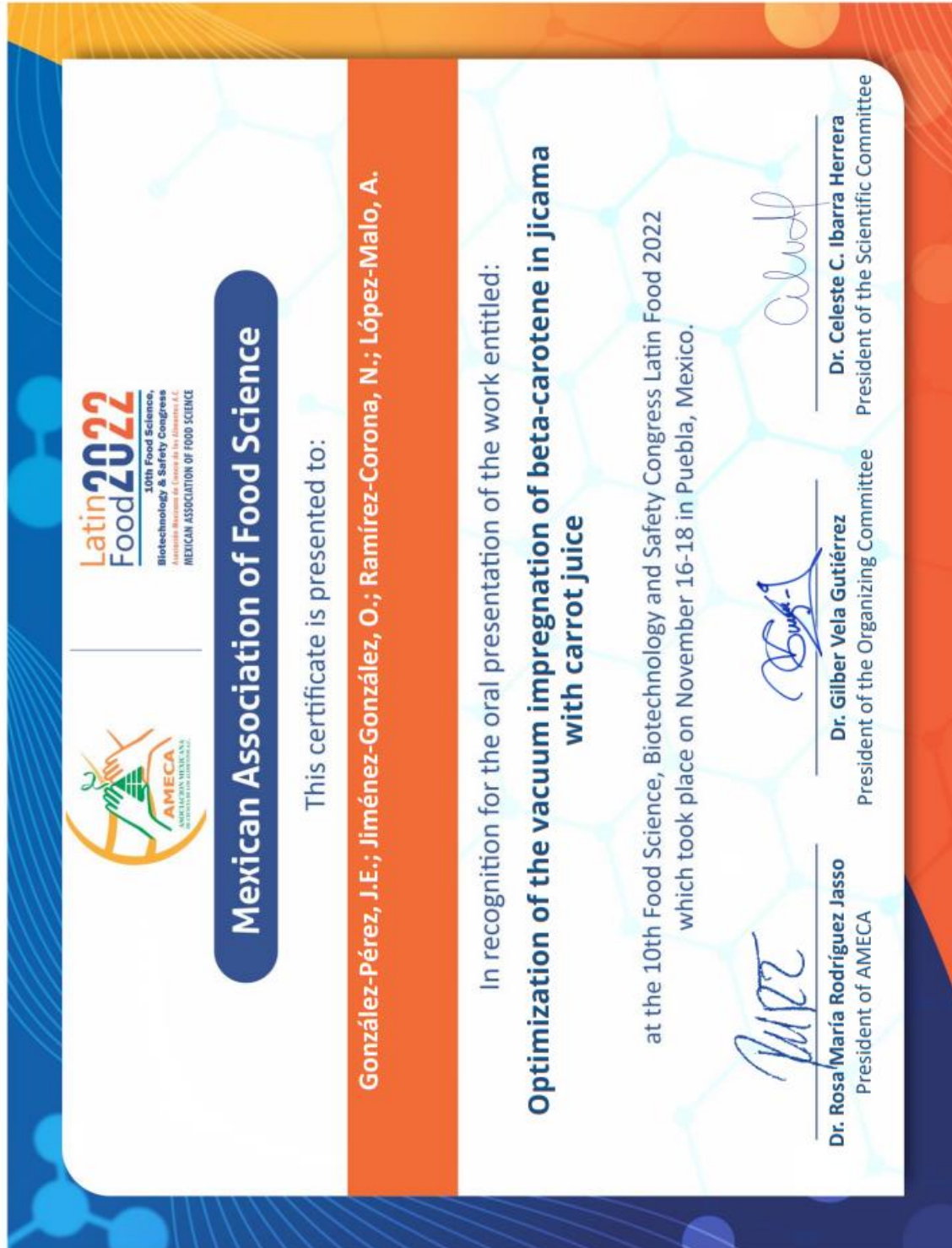
### Referencias

1. Lariña, C. P., Velezaga, S. R., Alzamora, S. M., Muzgojvi, M., Rodríguez, A. "Effect of the high-pressure assisted-injection processing on nutritional and antioxidant properties of mango cubes". *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 71 (2021) 107225. 2. Szabonova, M., Ellason, L., Maroz, A., Nowak, J., Ryznar, D., Lina, A., Kowalik, H. "The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extracts to sugar solutions on osmotic dehydration and sensory properties of apples". *J. Food Sci. Technol.* 56 (2019) 1827-1839. 3. Maldonado, M., González-Pedrozo, J. "Mathematical modeling of mass transfer phenomena for sucrose and lactose molecules during osmotic dehydration of cherries". *Int. J. Food Sci. Technol.* 47 (2012) 4670-4674. 4. Shukla, A., Shukla, R. S., Das, G., Ghosh, V. "Gingerroot infusion and multi-step process optimization for enhancement of color, sensory and functional profiles of candied mango". *J. Food Chem.* 360 (2019) 1-12.



**Figura 2.** Evolución de la tinción del tejido de manzana durante el proceso de osmodeshidratación con jugo de uva.

5. **González-Pérez, J.**, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. “Optimization of the vacuum impregnation of beta-carotene in jicama with carrot juice”, Latin Food 2022. Poster.



5. **González-Pérez, J., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A.** 2022. “Optimization of the vacuum impregnation of beta-carotene in jicama with carrot juice”, Latin Food 2022. Poster.



## Optimization of the vacuum impregnation of beta-carotene in jicama with carrot juice

González-Pérez, J.E.<sup>1\*</sup>, Jiménez-González, O.<sup>1</sup>, Ramírez-Corona, N.<sup>1</sup>, López-Malo, A.<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Dpto. de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. San Andrés Cholula, Puebla, Mexico. Email: julio.gonzalezpz@udlap.mx

### INTRODUCTION

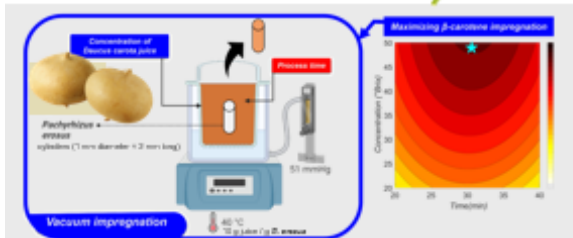
Carotenoid consumption has been shown to prevent and decrease certain types of cancer and cardiovascular and degenerative diseases [1]. Recently, alternatives for consuming foods rich in carotenoids have been sought [2].



### OBJECTIVE

This study aimed to evaluate the effect of vacuum pressure, processing time, and concentration of carrot juice concentrate on the quality of jicama impregnation using response surface methodology to maximize  $\beta$ -carotene from carrot (*Daucus carota*) juice concentrate into jicama (*Pachyrhizus erosus*) cylinders through vacuum impregnation.

### MATERIALS AND METHODS



### RESULTS AND DISCUSSION

The polynomial equations (PE, Table 1) obtained to describe SG, WL (Figure 1),  $a_w$  (Figure 2), TSS (Figure 3), and TC (Figure 4) of the product had  $R^2 > 0.85$ .

Increasing the C factor (concentration) increased the values ( $p < 0.05$ ) of SG, TC, and TSS and decreased ( $p < 0.05$ ) the values of WL and  $a_w$ .

The PE of the analyzed responses include a quadratic effect ( $p < 0.05$ ) of the process time, probably due to the saturation of solutes on the product surface.

The optimum conditions were  $t=32$  min and  $50^\circ\text{Brix}$ . At these conditions, the impregnated jicama reached a value of  $269 \mu\text{g}$   $\beta$ -carotene /  $100\text{g}$  dry basis,  $19.3^\circ\text{Brix}$ , and  $a_w=0.943$ .

This amount provides the  $\sim 30\%$  of minimum recommended percentage of daily carotenoid intake requirements for adults [3].

### CONCLUSION

It was possible to incorporate carotenoids in jicama by optimizing the vacuum impregnation conditions; however, a drying treatment is necessary to increase the shelf life of the product obtained.

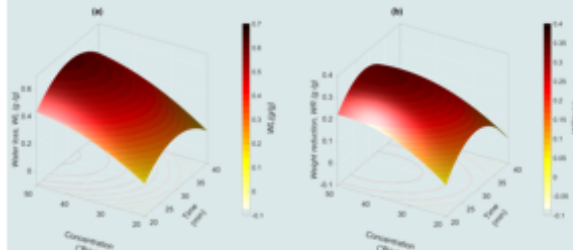
### Acknowledgments

Authors González-Pérez & Jiménez-González thanks to Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) and the National Council for Science and Technology (CONACYT) of Mexico for the financial support for their Ph.D. studies.

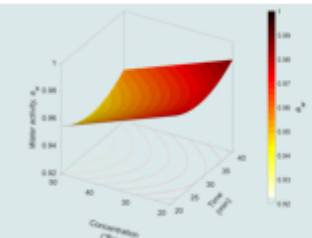
**Table 1.** Non-coded regression coefficients of second-order polynomial models.

Model	$R^2$	Lack of Fit
$M_h = 1.353 - 0.031 t - 0.0035 C + 0.0005 t^2$	0.846	0.35
$WR = -1.471 + 0.087 t + 0.024 C - 0.0014 t^2 - 0.0002 C^2 + 9.6 \times 10^{-4} t C$	0.986	0.28
$WL = -1.453 + 0.088 t + 0.025 C - 0.0015 t^2 - 0.0002 C^2 + 7.6 \times 10^{-4} t C$	0.984	0.43
$SG = 0.075 - 0.001 t$	0.733	—
$a_w = 1.043 - 0.0055 t + 0.001 C + 0.0001 t^2 - 0.00002 C^2 - 2 \times 10^{-4} t C$	0.798	0.23
$TSS = -44.70 + 2.801 t + 0.835 C - 0.0455 t^2 - 0.00536 C^2 + 1 \times 10^{-4} t C$	0.856	0.58
$TC = -0.006 + 0.0003 t + 0.0001 C - 6 \times 10^{-4} t^2 - 0.000001 C^2 + 1 \times 10^{-4} t C$	0.891	0.33

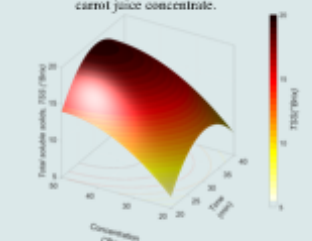
Parameters in bold have a significant ( $p \leq 0.05$ ) effect on Y.  $M_h$ , moisture fraction (g/g); WR, weight reduction (g/g); WL, water loss (g/g); SG, solute gain (g/g);  $a_w$ , water activity; TSS, total soluble solids ( $^\circ\text{Brix}$ ) and TC, total carotenoids (mg  $\beta$ -carotene /  $100\text{g}$  d.b.).



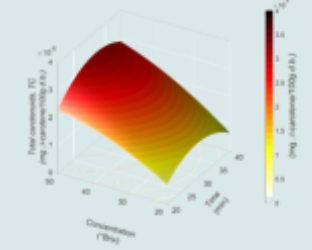
**Figure 1.** Time-concentration interaction (t-C) effect on (a) water, and (b) weight reduction of jicama cylinders impregnated with carrot juice concentrate.



**Figure 2.** Time-concentration interaction (t-C) effect on water activity of jicama cylinders impregnated with carrot juice concentrate.



**Figure 3.** Time-concentration interaction (t-C) effect on total soluble solids of jicama cylinders impregnated with carrot juice concentrate.



**Figure 4.** Time-concentration interaction (t-C) effect on total carotenoids of jicama cylinders impregnated with carrot juice concentrate.


### REFERENCES

- [1] Gilva, et al., 2019. Journal of Food Composition and Analysis Bioaccessibility, 78, 24–32.
- [2] Meléndez-Martínez et al., 2021. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62, 2099–2099.
- [3] Santana-Moreira et al., 2018. Journal of Food Process Preserv., 42, e12546.


6. **González-Pérez, J.E., López-Malo, A.** 2022. “Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate”, Latin Food 2022. Poster.




6. González-Pérez, J.E., López-Malo, A. 2022. “Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate”, Latin Food 2022. Poster.



10th Food Science,  
Biotechnology & Safety Congress





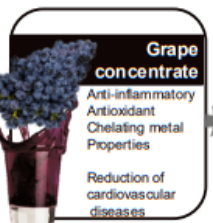
## Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate

González-Pérez, J.E.<sup>1\*</sup>, Ramírez-Corona, N.<sup>1</sup>, & López-Malo, A.<sup>1</sup>

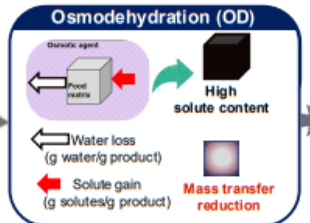
<sup>1</sup>Depto. de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, UDLAP. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, Mexico.  
Email: julio.gonzalezpz@udlap.mx

---

### INTRODUCTION

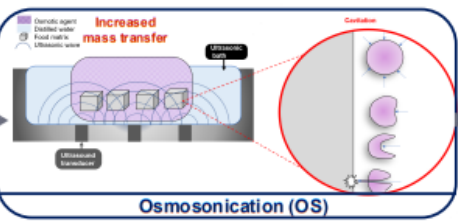


### Osmodehydration (OD)



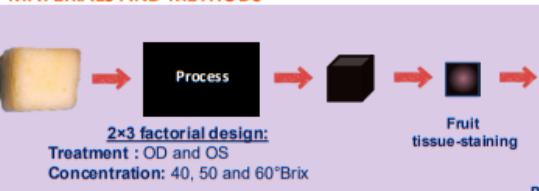
### OBJECTIVE

This study was aimed to model the mass transfer kinetics during osmosonication (OS) of apples in grape juice.



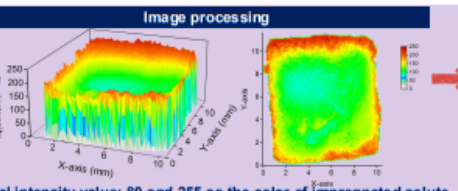
---

### MATERIALS AND METHODS



**2x3 factorial design:**  
Treatment : OD and OS  
Concentration: 40, 50 and 60°Brix

#### Image processing



Pixel intensity value: 80 and 255 as the color of impregnated solute

Water and solutes effective diffusion  
Crank's analytical solution

$$\ln(\Psi) = -\frac{3\pi^2 D}{4(L^2)}t + \ln\left(\frac{a^2}{a^2 - b^2}\right)$$

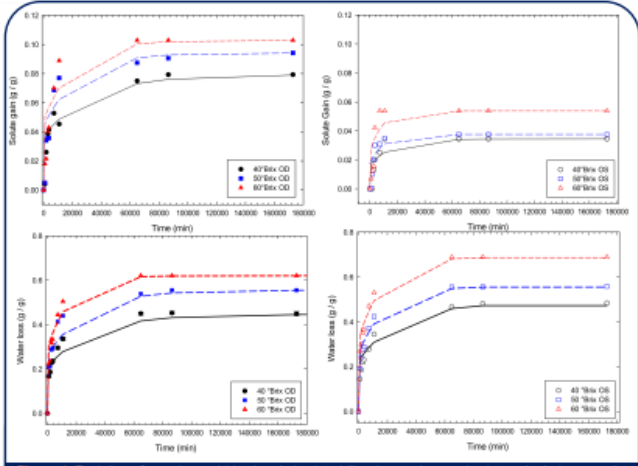
$$\text{slope} = \frac{3\pi^2 D}{4(L^2)}$$

$$\Psi = 1 - M(t)/M_e$$

---

### RESULTS AND DISCUSSION

The results showed that equilibrium conditions were reached at  $t > 64,800$  s (Figure 1). At these time, water loss increased ( $p < 0.05$ ) with OS procedure and high osmotic solution concentration. In addition, osmodehydrated samples had a greater solutes gain.





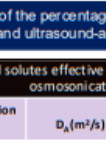
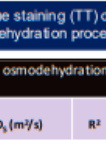


Concentration	Treatment	
	OD	OS
40 °Brix	 %TT 80%	 %TT 100%
50 °Brix	 %TT 75%	 %TT 80%
60 °Brix	 %TT 70%	 %TT 74%

Figure 2. Evolution of the percentage of apple tissue staining (TT) during the conventional and ultrasound-assisted osmodehydration process.

Treatment	Concentration (°Brix)	Water and solutes effective diffusion during osmodehydration and osmosonication procedure.				
		$D_w (m^2/s)$	$R^2$	$D_s (m^2/s)$	$R^2$	$D_w/D_s$
OD	40	$1.78 \times 10^{-10} B, j$	0.960	$1.64 \times 10^{-10} C, h$	0.838	1.1
	50	$2.03 \times 10^{-10} B, f$	0.929	$2.32 \times 10^{-10} B, f$	0.806	0.9
	60	$3.66 \times 10^{-10} A, a$	0.962	$2.64 \times 10^{-10} A, a$	0.842	1.4
OS	40	$2.00 \times 10^{-10} C, i$	0.964	$3.57 \times 10^{-10} C, g$	0.711	0.6
	50	$2.96 \times 10^{-10} B, e$	0.964	$5.81 \times 10^{-10} B, e$	0.805	0.5
	60	$3.27 \times 10^{-10} A, b$	0.979	$6.41 \times 10^{-10} A, b$	0.750	0.5

Note: In the same column, lowercase letters indicate a significant difference ( $p < .05$ ) when comparing the type of treatment at the same concentration. In the same column, capital letters indicate significant difference ( $p < .05$ ) when comparing between concentration.

---

### CONCLUSION

In conclusion, Crank's analytical solution was adequate to describe the transfer of water and solutes during osmosis procedures. Also, OS is adequate to increase water diffusion and homogenizing solutes impregnation in product tissue.

### REFERENCES

[1] Lamas et al., 2015. *International Journal of Experimental Pathology*, 96, 301-310.  
 [2] González-Pérez et al., 2021. *Food Engineering Reviews*, 13, 344-374.  
 [3] Oae et al., 2019. *Journal of Food Biochemistry*, 43, 1-14.

---

### ACKNOWLEDGMENTS

Author González-Pérez gratefully acknowledges financial support for his Ph.D. studies from Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) and the National Council for Science and Technology (CONACYT).



6. **González-Pérez, J.E., López-Malo, A.** 2022. “Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate”, Latin Food 2022. Poster.



*Futuras presentaciones en congresos*

1. **González-Pérez, J.E.**, López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. (2023). “Mass transfer analysis during dehydration of *Pyrus communis* variety "Lechera" by microwave drying”, 11th World Congress of Chemical Engineering. Poster.
2. **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N.,(2023). “Modelación de las cinéticas de secado por liofilización de manzana fresca e impregnada con zanahoria”, 2023. Poster. XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Poster.
3. **González-Pérez, J.E.**, Romo-Hernández, A., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. (2023). “Análisis de transferencia de masa durante la deshidratación de *Pyrus comunis* variedad "Lechera" mediante secado por microondas”, Memorias del XLIX Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Poster.

## **PARTICIPACIONES FUTURAS EN CONGRESOS (MODALIDAD PÓSTER)**

1. **González-Pérez, J.E.,** López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. (2023). “Mass transfer analysis during dehydration of *Pyrus communis* variety "Lechera" by microwave drying”, 11th World Congress of Chemical Engineering. Poster.

[WCCE11] Editor Decision

Viviana Olga Salvadori <vosalvad@ing.unlp.edu.ar>  
mediante plapiqui.edu.ar

Miè 18/01/2023 14:05

Para: Julio Emmanuel Gonzalez Perez <julio.gonzalezpz@udlap.mx>; Aurelio Lopez Malo Vigil <aurelio.lopezm@udlap.mx>; Nelly Corona <rcnelly@yahoo.com>

Julio Emmanuel González-Pérez , Aurelio López-Malo, Nelly Corona:

We have reached a decision regarding your submission to 11th World Congress of Chemical Engineering and its associated events, "Mass transfer analysis during dehydration of *Pyrus communis* variety "Lechera" by microwave drying".

Our decision is to accept this submission.

**The type of presentation (Oral-Rapid fire-"Poster) will be defined later.**

---

Prof. Noemí Zaritzky  
President of the Executive Scientific Committee



### **WCCE11 - 11th WORLD CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING**

IACCHE - XXX INTERAMERICAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING  
CAIQ2023 - XI ARGENTINIAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING  
CIBIQ2023 - II IBEROAMERICAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING

**Buenos Aires - Argentina - June 4-8, 2023**

*"The global chemical engineering working for a better future world"*

2. **González-Pérez, J.E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N.,(2023). “Modelación de las cinéticas de secado por liofilización de manzana fresca e impregnada con zanahoria”, 2023. Poster. XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Poster.



**XLIV**

CONSEJO DIRECTIVO 2021-2023

Dr. Jorge Ramón Robledo Ortiz  
**PRESIDENTE**  
jorge.robledo@academicos.udg.mx

Dra. Nelly Ramírez Corona  
**VICEPRESIDENTA**  
nelly.ramirez@udlap.mx

Dr. Fernando Israel Gómez Castro  
**SECRETARIO**  
iq\_fergo@hotmail.com

Dra. Sara Núñez Correa  
**TESORERA**  
samunez@uv.mx

Dra. Aida Alejandra Pérez Fonseca  
**VOCAL DE INVESTIGACIÓN**  
aida.perez@academicos.udg.mx

Dra. Adela Irmene Ortiz López  
**VOCAL DE DOCENCIA**  
irmene@cua.uam.mx

contacto@amidiq.com  
WWW.AMIDIQ.COM  
Canarias 704 Portales  
CDMX, Benito Juárez  
México, CP 03300

## ENCUENTRO NACIONAL DE LA AMIDIQ

Investigación e industria:  
inclusión, retos y oportunidades  
para la Ingeniería Química en México

Ciudad de México a jueves, 13 de abril de 2023

### Estimado(a) autor(a) de contacto

Agradecemos sinceramente su interés por participar en el XLIV Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C. (AMIDIQ). Por este conducto nos complace informarle que su trabajo:

### MODELACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO POR LIOFILIZACIÓN DE MANZANA FRESCA E IMPREGNADA CON JUGO CONCENTRADO DE ZANAHORIA

ID: 40

### Cuyos autores son:

*Julio Emmanuel González-Pérez, Oscar Jiménez-González, Nelly Ramírez-Corona*

ha sido aceptado para su presentación en la sesión de **Ingeniería de alimentos en la modalidad Cartel**

Para ser acreedor de la constancia de participación se requiere que al menos uno de los **autores esté inscrito**, y que el **trabajo haya sido efectivamente presentado**. Para que el trabajo sea publicado en las memorias del congreso, es necesario cumplir con los criterios anteriores y haber enviado su trabajo en extenso.

En fechas posteriores podrá consultar el programa completo en nuestra página web [www.amidiq.com](http://www.amidiq.com) para conocer el día y hora precisa de su presentación. Recuerde que tiene hasta el **21 de abril** para sustituir el resumen de dos páginas por su trabajo en extenso en la plataforma OpenConf y que al menos uno de los autores del trabajo deberá estar inscrito al evento a más tardar el **21 de abril** para ser incluido en el programa final.

A nombre de la AMIDIQ le agradecemos una vez más su participación y esperamos tener la oportunidad de saludarlo durante el evento.

**Atentamente**

**COMITÉ TÉCNICO**

**XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ A.C.**

3. **González-Pérez, J.E., Romo-Hernández, A., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. (2023).** “Análisis de transferencia de masa durante la deshidratación de *Pyrus communis* variedad "Lechera" mediante secado por microondas”, Memorias del XLIX Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Poster.



**XLIV**

CONSEJO DIRECTIVO 2021-2023

Dr. Jorge Ramón Robledo Ortiz  
PRESIDENTE  
jorge.robledo@academicos.udg.mx

Dra. Nelly Ramírez Corona  
VICEPRESIDENTA  
nelly.ramirez@udlap.mx

Dr. Fernando Israel Gómez Castro  
SECRETARIO  
iq\_fergo@hotmail.com

Dra. Sara Núñez Correa  
TESORERA  
samunez@uv.mx

Dra. Aida Alejandra Pérez Fonseca  
VOCAL DE INVESTIGACIÓN  
aida.perez@academicos.udg.mx

Dra. Adela Irmene Ortiz López  
VOCAL DE DOCENCIA  
irmene@cua.uam.mx

contacto@amidiq.com  
WWW.AMIDIQ.COM  
Canarias 704 Portales  
CDMX, Benito Juárez  
México, CP 03300

## ENCUENTRO NACIONAL DE LA AMIDIQ

Investigación e industria:  
inclusión, retos y oportunidades  
para la Ingeniería Química en México

Ciudad de México a jueves, 13 de abril de 2023

### Estimado(a) autor(a) de contacto

Agradecemos sinceramente su interés por participar en el XLIV Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C. (AMIDIQ). Por este conducto nos complace informarle que su trabajo:

**ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE MASA DURANTE LA DESHIDRATACIÓN DE *Pyrus communis* VARIEDAD "LECHERA" MEDIANTE SECADO POR MICROONDAS**

ID: 69

### Cuyos autores son:

*Julio Emmanuel González-Pérez, Aarón Romo-Hernández, Aurelio López-Malo, Nelly Ramírez-Corona*

ha sido aceptado para su presentación en la sesión de **Ingeniería de alimentos en la modalidad Cartel**

Para ser acreedor de la constancia de participación se requiere que al menos uno de los **autores esté inscrito**, y que el **trabajo haya sido efectivamente presentado**. Para que el trabajo sea publicado en las memorias del congreso, es necesario cumplir con los criterios anteriores y haber enviado su trabajo en extenso.

En fechas posteriores podrá consultar el programa completo en nuestra página web [www.amidiq.com](http://www.amidiq.com) para conocer el día y hora precisa de su presentación. Recuerde que tiene hasta el **21 de abril** para sustituir el resumen de dos páginas por su trabajo en extenso en la plataforma OpenConf y que al menos uno de los autores del trabajo deberá estar inscrito al evento a más tardar el **21 de abril** para ser incluido en el programa final.

A nombre de la AMIDIQ le agradecemos una vez más su participación y esperamos tener la oportunidad de saludarlo durante el evento.

Atentamente

COMITÉ TÉCNICO  
XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ A.C.

### ***Presentaciones en congresos durante el doctorado***

1. **González Perez, J.E.**, Jiménez González, O., Reyes-Jurado, F., Ramírez-Corona, N. 2019. “Diseño de mezclas con extractos acuosos de plantas para la inhibición de *Salmonella typhi*”. XL Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Huatulco, Oaxaca. México.
2. **González-Pérez, J. E.**, Jiménez-González, O. y López-Malo, A., Guerrero-Beltrán, J. Á. 2022. “Modelación del tiempo de germinación de esporas de *Aspergillus flavus* en presencia de carvacrol”, XXIII Congreso Internacional de Inocuidad de Alimentos, Poster, Modalidad Virtual.
3. **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-González, O., López-Malo, A. 2020. “Effect of temperature and NaCl concentration on quality parameters of spaghetti rehydrated: texture and color characteristics”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.
4. **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Análisis de la transferencia de masa y de las características dimensionales de pasta rehidratada con agua o soluciones de cloruro de sodio”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Modalidad virtual.
5. Guerrero Beltrán, J.A., **González-Pérez, J.**, Jiménez González, O., Recio, S.L. 2020. “Physicochemical and sensory analysis characteristics of inulin-xanthan gum, mesquite gum-carrageenan, and egg albumin-gelatin as replacers of gelatin in marshmallow”, IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.
6. Guerrero Beltrán, J.A., Jiménez González, O., **González-Pérez, J.**, Recio, S.L. 2020. “Vanilla ice cream with *Lactobacillus rhamnosus* as a source of probiotics added before and after maturation”, IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.
7. Guerrero Beltrán, J.A., Recio, S.L. Jiménez González, O., **González-Pérez, J.**, 2020. “Physicochemical and sensory characteristics of cookies elaborated with residues of chia oil extraction”, IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.
8. Jiménez González, O., Reyes-Jurado, F., **González-Pérez, J.**, 2021. “Inhibición de *Salmonella typhi* utilizando extractos acuosos de semilla de *Renalmia alpinia*”, 4to Congreso Internacional de Alimentos Funcionales (Alfanutra), Modalidad virtual.

9. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, Guerrero-Beltrán, J. Á. 2022. “Obtención de pigmentos mediante secado por aspersion de jugo hidrolizado de pitaya roja (*Stenocerus pruinosus*)”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
10. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, López-Malo, A. 2022. “Prediction of perceived color changes of a natural colorant from *Justicia spicigera* by using probabilistic and time-to fail models, Latin Food 2022. Poster. Puebla, Pue. México.
11. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, y López-Malo, A. 2021. “Predicción de la supervivencia de *Aspergillus flavus*: modelo probabilístico y tiempo de falla”, XXIII Congreso Internacional de Inocuidad de Alimentos, Poster, Modalidad Virtual.
12. Jiménez-González, O., Recio-Cázares, E.L., **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-Munguía, M.T. 2021. “Efecto de la formulación en las propiedades físicas y de instantaneización de leche en polvo”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Modalidad virtual.
13. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, López-Malo, A. 2020. “Spend coffee ground agglomerations as size enlargement with future applications”, e-Latin Food 2020, 9<sup>th</sup> Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.
14. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, Guerrero-Beltrán, J.A. 2020. “Sensory evaluation of Mexican salsas prepares with Jalapeño, Poblano or Serrano var. Tampiqueño chili pepers”, e-Latin Food 2020, 9<sup>th</sup> Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.

1. **González Perez, J.E.**, Jiménez González, O., Reyes-Jurado, F., Ramírez-Corona, N. 2019. “Diseño de mezclas con extractos acuosos de plantas para la inhibición de *Salmonella typhi*”. XL Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Huatulco, Oaxaca. México.





1. **González Perez, J.E.,** Jiménez González, O., Reyes-Jurado, F., Ramírez-Corona, N. 2019. "Diseño de mezclas con extractos acuosos de plantas para la inhibición de *Salmonella typhi*". XL Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Huatulco, Oaxaca. México.

UDLAP.

## DISEÑO DE MEZCLAS CON EXTRACTOS ACUOSOS DE PLANTAS PARA LA INHIBICIÓN DE *Salmonella typhi*

González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O., Reyes-Jurado, F., Ramírez-Corona, N.

AMIDIQ

---

**Introducción**

Las plantas medicinales son una de las fuentes más importantes en el tratamiento de enfermedades ya que presenta diferentes propiedades antibacterianas y no tienen efectos adversos contra el ser humano [1], pues contienen diferentes compuestos como ácidos fenólicos, flavonoides, taninos, vitaminas y terpeno los cuales pueden o tienen efecto en la inhibición de microorganismos [2]. Dentro de estas plantas se encuentra a la manzanilla, que ha reportado tener un efecto en el tratamiento de distintas enfermedades [4], la jamaica, además de sus propiedades antioxidantes, diferentes estudios demuestran la inhibición de microorganismos [3].

Por otro lado, *Salmonella* spp., ha sido asociada con el padecimiento de enfermedades digestivas, ya que se le puede encontrar en diferentes alimentos.

**Objetivo**

Hacer uso de diferentes extractos acuosos de jamaica, manzanilla y hojas de limón para la inhibición de *Salmonella typhi* utilizando un diseño de mezclas simplex centroide

**Metodología**

**Preparación de los extractos**

120 g de Manzanilla  
20 g de Hojas de limón  
50 g de Flores de jamaica

+

500 mL de agua  
Manteniendo en ebullición durante 30 minutos.

**Mezcla con el medio de cultivo**

Se agregaron diferentes proporciones de los extractos sustituyendo el agua requerida para la preparación del medio, siguiendo el diseño de mezclas (Tabla 1) y diferentes porcentajes de sustitución (20, 40 y 80%)

**Siembra de *S. typhi***

Se depositaron 50µL sobre al superficie del agar usando un sembrador en espiral. El recuento se realizó mediante un contador automático.

**Análisis estadístico**

Hacer uso de diferentes extractos acuosos de jamaica, manzanilla y hojas de limón para la inhibición de *Salmonella typhi* utilizando un diseño de mezclas simplex centroide que eran significativos con un 95% de confianza para las tres concentraciones de la sustitución, todos los experimentos se realizaron por triplicado

**Resultados y discusión**

La inhibición de *S. typhi* se debía principalmente a los extractos de jamaica, desde 20% se observó la completa inhibición, reduciendo alrededor de 9.5 Log UFC/mL ciclos logarítmicos en comparación con el blanco. Por otro lado, el efecto mas bajo lo tuvo la adición de los extractos de hojas de limón, ya que el punto axial que corresponde a la adición únicamente de este extracto y no a la mezcla redujo medio ciclo logarítmico incluso en concentraciones de 80% de sustitución.

Se obtuvieron los modelos que describían el comportamiento de los datos experimentales los cuales se muestran en la Tabla 2. El ajuste de los modelos fue arriba del 76%.

La interacción triple (limón-manzanilla-jamaica) así como la interacción doble (limón-manzanilla) en las tres concentraciones no fueron significativas (P>0.05).

Las graficas de contorno (Figura 1 a-c), muestran el efecto de cada uno de los factores en cada modelo, la jamaica inhibió el crecimiento de bacterias en todas las concentraciones y el efecto de inhibición se hace

**Tabla 2. Coeficientes obtenidos para el modelo cubico especial d el diseño experimental**

Coeficientes	Concentración		
	Sustitución al 20%	Sustitución al 40%	Sustitución al 80%
βa (limón)	9.47	9.33	7.34
βb (manzanilla)	7.26	7.56	7.44
βc (jamaica)	0.66	0.12	1.15
βac	n.r.	-13.04	-21.98
βbc	-20.96	-16.03	-22.21
R <sup>2</sup> (%)	79.13	76.31	78.04

n.r. no reportado debido a que se eliminó del modelo

**Figura 1. Contornos obtenidos para la inhibición de *Salmonella* (izquierda), placas de após de la adición de los extractos 80% A) limón, B) manzanilla y C) jamaica.**

**Tabla 1. Diseño de mezclas**

Experimento	Limón (mL)	Manzanilla (mL)	Jamaica (mL)
1	1 (20)	0 (0)	0 (0)
2	0 (0)	1 (20)	0 (0)
3	0 (0)	0 (0)	1 (20)
4	1/2 (10)	1/2 (10)	0 (0)
5	0 (0)	1/2 (10)	1/2 (10)
6	1/2 (10)	0 (0)	1/2 (10)
7	1/6 (3.33)	2/3 (13.33)	1/6 (3.33)
8	1/6 (3.33)	1/6 (3.33)	2/3 (13.33)
9	2/3 (13.33)	1/6 (3.33)	1/6 (3.33)
10	1/3 (6.67)	1/3 (6.67)	1/3 (6.67)

**Bibliografía**

1. Hsieh, C. (2016). Antimicrobial activity of plant extracts of *Salmonella typhi* and *Salmonella enteritidis*. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 1(1), 1-10.

2. Durrant, L., Durrant, L., Durrant, L. (2018). Antimicrobial activity of various plant extracts. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 1(1), 1-10.

3. Mak, Y. W., Chua, L. C., Ahmad, F., & Hsu, R. (2013). Antimicrobial and cytotoxic activities of *Salmonella typhi* and *Salmonella enteritidis* against *Salmonella typhi* and *Salmonella enteritidis*. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 1(1), 1-10.

4. Hsieh, C. (2016). Antimicrobial activity of plant extracts of *Salmonella typhi* and *Salmonella enteritidis*. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 1(1), 1-10.

5. Hsieh, C. (2016). Antimicrobial activity of plant extracts of *Salmonella typhi* and *Salmonella enteritidis*. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 1(1), 1-10.

6. Hsieh, C. (2016). Antimicrobial activity of plant extracts of *Salmonella typhi* and *Salmonella enteritidis*. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 1(1), 1-10.

**Información de Contacto**

Para más información por favor contactar:

Dr. J. E. González Pérez  
Dr. O. Jiménez González  
Dr. F. Reyes-Jurado  
Dr. N. Ramírez-Corona

UDLAP.

Departamento de Ingeniería Química, Alimento y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Ex Hacienda San Gabriel, Puebla, México. C.P. 72160.

2. **González-Pérez, J. E.,** Jiménez-González, O. y López-Malo, A., Guerrero-Beltrán, J. Á 2022. “Modelación del tiempo de germinación de esporas de *Aspergillus flavus* en presencia de carvacrol”, XXIII Congreso Internacional de Inocuidad de Alimentos, Poster, Modalidad Virtual.

**XXIII Congreso Internacional**  
**Inocuidad de Alimentos**  
XXXVIII Reunión Nacional de Microbiología, Higiene y Toxicología de los Alimentos  
Edición Online 4, 5 y 6 de noviembre 2021

La Universidad de Guadalajara otorga la presente  
**CONSTANCIA**

Universidad de Guadalajara

UCEI

A: González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O., y López-Malo, A.

por su participación como:

Autores del trabajo libre presentado en modalidad cartel  
“Modelación del tiempo de germinación de esporas de *Aspergillus flavus* en presencia de carvacrol”

*Ruth Padilla Muñoz*  
Dra. Ruth Padilla Muñoz  
Rectora del Centro Universitario de  
Ciencias Exactas e Ingenierías

*Oscar Blanco Alonso*  
Dr. Oscar Blanco Alonso  
Secretario Académico del Centro Universitario de  
Ciencias Exactas e Ingenierías

**2. González-Pérez, J. E., Jiménez-González, O. y López-Malo, A., Guerrero-Beltrán, J. Á 2022. “Modelación del tiempo de germinación de esporas de *Aspergillus flavus* en presencia de carvacrol”, XXIII Congreso Internacional de Inocuidad de Alimentos, Poster, Modalidad Virtual.**



**Modelación del tiempo de germinación de esporas de *Aspergillus flavus* en presencia de carvacrol**

**González-Pérez, J. E., Jiménez-González, O. y López-Malo, A.**

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla.



Contacto: aurelio.lopezm@udlap.mx

**Introducción**



Su crecimiento se ve influenciado por la actividad de agua (aw), temperatura, pH, composición de la atmósfera (O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>), agentes antimicrobianos, tiempo de almacenamiento, entre otros [2, 4-5].

Modelos matemáticos han sido usados para predecir las condiciones de fermentación, elaboración y almacenamiento para prevenir el crecimiento de *A. flavus* en ciertos alimentos [5,6]. Un ejemplo de estos modelos es el modelo de tiempo de detección que permite ajustar la probabilidad de que se detecte el crecimiento de cierto microorganismo bajo ciertas condiciones [6].

En este trabajo, la respuesta del tiempo para detectar el crecimiento de *A. flavus* en un sistema modelo con diferentes combinaciones de a<sub>w</sub>, pH y concentración de carvacrol previamente estudiado por López-Malo y colaboradores [7] fueron usados con el objetivo de describir el tiempo de germinación de esporas de *A. flavus* mediante un modelo de tiempo de detección.

**Materiales y métodos**

**Tabla 1. Tiempo medio de germinación (lag) de *Aspergillus flavus* en agar papa dextrosa formulado con valores seleccionados de a<sub>w</sub>, pH y diferentes concentraciones de carvacrol a 25°C.**

a <sub>w</sub>	pH	Concentración de carvacrol (ppm)	Lag (h)	Censura *
0.95	4.5	0	30.7	F
0.95	4.5	300	103.0	F
0.95	4.5	200	385.5	F
0.95	4.5	300	>700	C
0.95	4.5	400	>700	C
0.95	4.5	500	>700	C
0.95	4.5	600	>700	C
0.95	4.5	700	>700	C
0.95	3.5	0	39.4	F
0.95	3.5	100	92.8	F
0.95	3.5	200	>700	C
0.95	3.5	300	>700	C
0.95	3.5	400	>700	C
0.95	3.5	500	>700	C
0.99	4.5	0	37.4	F
0.99	4.5	100	35.9	F
0.99	4.5	200	104.8	F
0.99	4.5	300	622.1	F
0.99	4.5	400	>700	C
0.99	4.5	500	>700	C
0.99	4.5	600	>700	C
0.99	4.5	700	>700	C
0.99	3.5	0	37.5	F
0.99	3.5	100	49.3	F
0.99	3.5	200	64.0	F
0.99	3.5	300	>700	C
0.99	3.5	400	>700	C
0.99	3.5	500	>700	C

\* C = dato censado (sin crecimiento), F = falla (crecimiento) López-Malo y colaboradores [7].



**Datos experimentales [7]:** Se inoculó un sistema modelo (formulado con agar papa dextrosa y carvacrol)

**Variables (composición del sistema modelo)**  
 X<sub>1</sub> → a<sub>w</sub> (0.99 o 0.95)  
 X<sub>2</sub> → pH (4.5 o 3.5)  
 X<sub>3</sub> → Concentración de carvacrol (0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 y 700 ppm)



Lag → tiempo de germinación de *Aspergillus flavus* en sistemas modelo incubados a 25°C durante 700 h

**Respuesta:**  
Lag → tiempo de germinación de *Aspergillus flavus* en sistemas modelo incubados a 25°C durante 700 h

Modelo de tiempo de detección

$$\ln[TPD(X)] = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 (1)$$

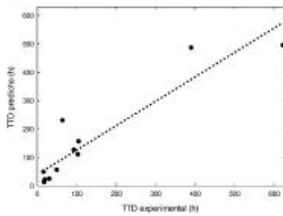
$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{s_i} \quad (2)$$

**Análisis estadístico**  
El ajuste de regresión del modelo se realizó con el software Minitab 18.



**Resultados**

El modelo de tiempo de detección de la germinación de esporas de *A. flavus* se presenta en la Tabla 2. La interacción "a<sub>w</sub> x pH" no mostró tener un efecto significativo (p > 0.15). No obstante, el modelo reducido permite describir los datos experimentales (TTD experimentales) con un coeficiente de correlación, R<sup>2</sup>=0.86 como se muestra en la Fig. 1.



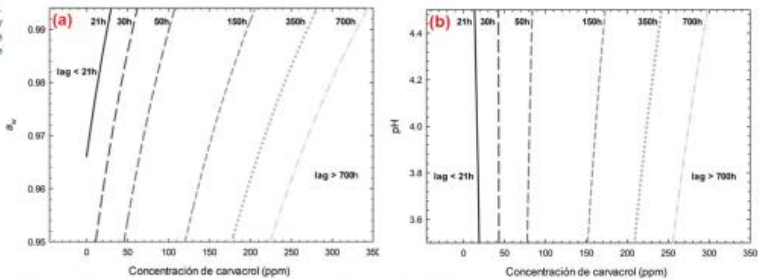
**Figura 1. Tiempo de detección (TTD) experimental y predicho de la germinación de esporas de *Aspergillus flavus* en agar papa dextrosa formulado con valores seleccionados de a<sub>w</sub> y pH y diferentes concentraciones de carvacrol (ppm).**

**Tabla 2. Coeficientes significativos del modelo del tiempo de detección.**

Variable	Coefficiente *
Interacción	7.31
a <sub>w</sub>	β <sub>1</sub> -0.75
pH	β <sub>2</sub> -0.33
CC	β <sub>3</sub> 3.07
a <sub>w</sub> x pH	β <sub>12</sub> -
a <sub>w</sub> x CC	β <sub>13</sub> -0.36
pH x CC	β <sub>23</sub> -0.27

Concentración de carvacrol (CC, ppm).  
\* p < 0.15, modelo con variables normalizadas.

En la Fig. 2 se muestran los gráficos de la predicción del tiempo para que se detecte la germinación (21 h < lag < 700 h) de *A. flavus* en sistemas modelo en función de diferentes concentraciones de carvacrol y a<sub>w</sub> a pH=4.5 (Fig. 2a) y diferentes concentraciones de carvacrol y pH con a<sub>w</sub>=0.95 (Fig. 2b). Se puede observar que el tiempo en detectar la germinación aumenta con el incremento de la concentración de carvacrol y la disminución en el valor de a<sub>w</sub> (Fig. 2a); además, se observa una ligera pendiente positiva, la cual aumenta con la concentración y a<sub>w</sub>.



**Figura 2. Predicción del tiempo para que se detecte la germinación (lag) de *Aspergillus flavus* en agar papa dextrosa formulado con concentraciones seleccionadas de carvacrol, (a) pH=4.5 y aw seleccionadas y (b) aw=0.95 y pH seleccionado.**

Por otro lado, en la Fig. 2b se muestra la interacción entre la concentración de carvacrol y pH, la cual influye en el tiempo de germinación. Al igual que en la Fig. 2a el aumento de la concentración de carvacrol extiende el tiempo al cual se detecta la germinación de *A. flavus*, y la influencia del pH no es tan evidente a concentraciones bajas, pero sí en concentraciones más altas (mayores a 200 ppm). El modelo de tiempo de detección se ha utilizado para describir la tasa de crecimiento máximo de *Clostridium botulinum* 56A considerando como condiciones de estrés el tamaño de inóculo (1, 100 o 10 000 esporas), la concentración de cloruro de sodio y pH a 14 días [8].

**Conclusiones**

El modelo de tiempo de detección es una herramienta útil para modular el tiempo de germinación de esporas de *A. flavus*. Asimismo, proporciona un medio práctico para evaluar los efectos combinados de las condiciones de formulación un sistema modelo (variando a<sub>w</sub>, pH y la concentración de carvacrol). Se requiere de al menos 350 ppm de carvacrol para inhibir la germinación de las esporas de *A. flavus*.

**Agradecimientos**

Los autores González-Pérez y Jiménez-González agradecen el apoyo financiero para sus estudios de doctorado de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México.

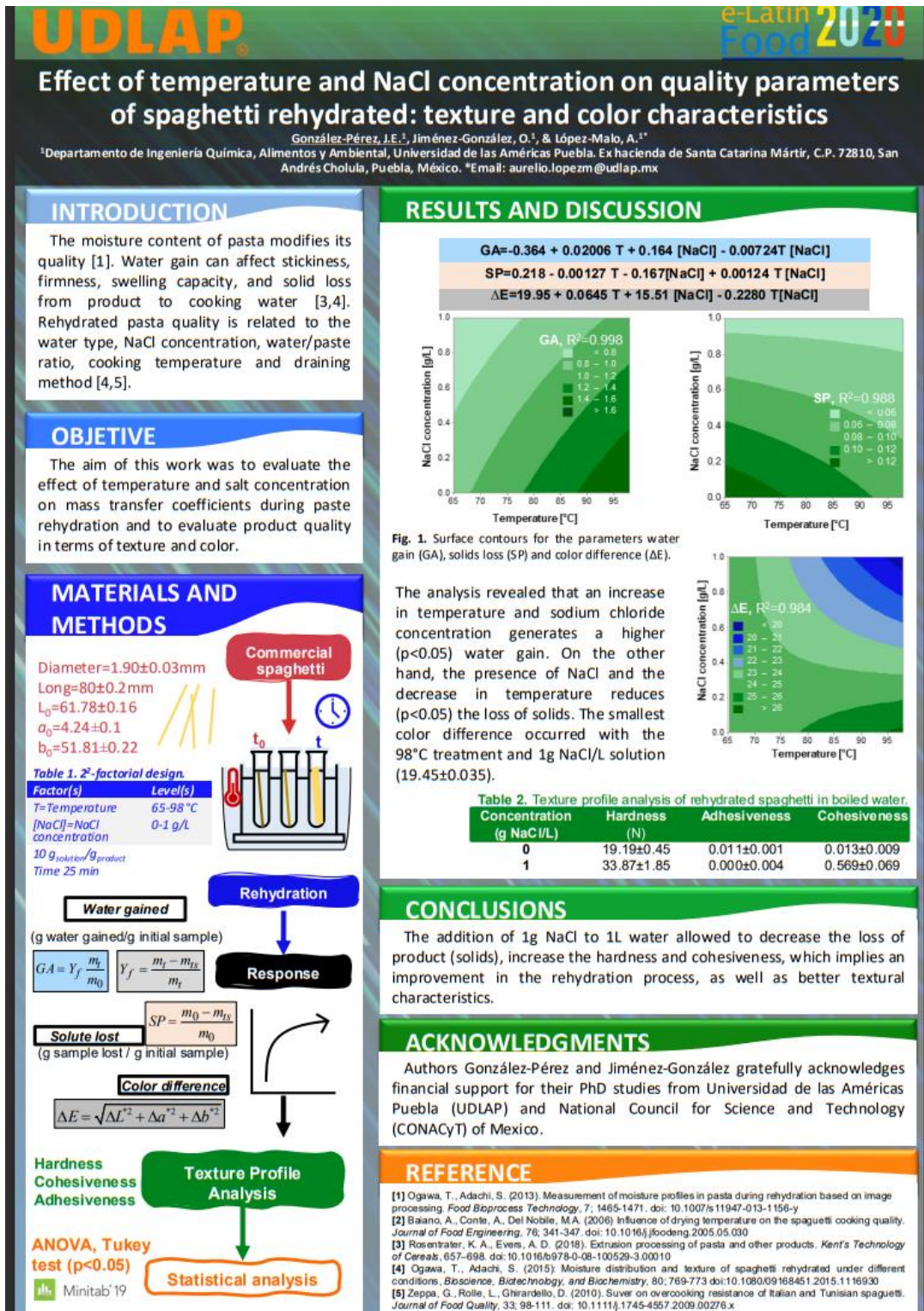
**Referencias**

- Liu J. C. et al. (2019). Carvacrol and thymol are potential preservatives against *Aspergillus* in maize grains. *Biot. J. Food Agric.* 3(1): 1-25-26.
- Gardner P. et al. (2010). Effect of stressors on the growth of *Aspergillus* in relation to concentration, temperature and water activity. *LEI. Appl. Microbiol.* 33(1): 50-55.
- Li H. et al. (2020). Research progress of the effect of environmental factors on *Aspergillus* growth and aflatoxin production on beans. *Food Qual. Saf.* 4(1): 21-26.
- Neogochan C. E. et al. (2017). Detection of *Aspergillus* species growth under the influence of different factors under activity, incubation temperature, pebble and salt concentration, pH, and carbon source of corn cobs by using probability of growth and time-to-detection models. *Int. J. Food Microbiol.* 246(1): 115-120.
- Lee S. et al. (2014). Mathematical models to predict germination behavior and toxin production of *Aspergillus* *flavus* under various temperature and water activity conditions. *Food Sci. Biotechnol.* 23(3): 635-642.
- Pérez C., López-Malo A. (2006). Predicting modeling of *Aspergillus* growth. *Advances in Food Biotechnology*, Volume 517. Hocking A. D., Pitt J. I., Samson R. A., Thesis U. (Eds.). First Edition, 287-300. Springer, US.
- López-Malo A. et al. (2005). *Aspergillus* growth in the presence of chemical preservatives and naturally occurring antimicrobial compounds. *Int. J. Food Microbiol.* 96(2): 119-128.
- Zhou L. et al. (2005). Inoculum Size of *Clostridium botulinum* Spores Influences Time-to-Detect and Percent Growth-Positive Samples. *J. Food Sci.* 68(3): 1360-1375.

3. **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-González, O., López-Malo, A. 2020. “Effect of temperature and NaCl concentration on quality parameters of spaghetti rehydrated: texture and color characteristics”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.



3. **González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O., López-Malo, A.** 2020. “Effect of temperature and NaCl concentration on quality parameters of spaghetti rehydrated: texture and color characteristics”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.



4. **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Análisis de la transferencia de masa y de las características dimensionales de pasta rehidratada con agua o soluciones de cloruro de sodio”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Modalidad virtual.



4. **González-Pérez, J.E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Análisis de la transferencia de masa y de las características dimensionales de pasta rehidratada con agua o soluciones de cloruro de sodio”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Modalidad virtual.

## Análisis de la transferencia de masa y de las características dimensionales de pasta rehidratada con agua o soluciones de cloruro de sodio

**UDLAP** J. E. González-Pérez, O. Jiménez-González, N. Ramírez-Corona, A. López-Malo aurelio.lopezm@udlap.mx

**Introducción**  
 Uno de los principales aspectos a evaluar de las pastas deshidratadas es su capacidad de absorción de agua. Esta propiedad afecta a la calidad del producto rehidratado, como la pegajosidad, la firmeza, el hinchamiento y la pérdida de sólidos en el agua de cocción [1]. La industria alimentaria ha desarrollado modelos para predecir la rehidratación de productos alimenticios ya sea de forma empírica o teórica [2]. Los modelos matemáticos permiten diseñar y optimizar operaciones de hidratación o rehidratación [3].

**Objetivo**  
 El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la temperatura y la presencia de sal en el medio líquido de rehidratación sobre los coeficientes de transferencia de masa y las características dimensionales durante la rehidratación de la pasta.

**Materiales y métodos**  
 $d_p = 1.9 \pm 0.03 \text{ mm}$   
 $L = 80 \pm 0.2 \text{ mm}$

**Transferecia de masa**

$$GA = Y_f \frac{m_t}{m_0} \quad (1)$$

$$Y_f = \frac{m_t - m_{ts}}{m_0 - m_{ts}} \quad (2)$$

$$PS = \frac{m_t - m_{ts}}{m_0} \quad (3)$$

$$\Psi = 1 - \frac{GA}{GA_{t=25 \text{ min}}} \quad (4)$$

Evolución del diámetro [5]

$$\frac{d}{d_0} = \Delta + (1 - \Delta) \Psi^m \quad (5)$$

**Modelación**  
 Fracción de humedad libre adimensional ( $\Psi$ ) [6,7]

$$\Psi = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\beta_n^2} \exp\left[-\frac{D\beta_n^2}{(d/2)^2} t\right]; \quad (6)$$

$$\beta_n = 2.4048 \quad (7)$$

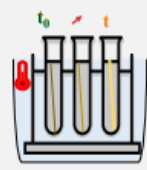
$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2}; \quad \theta = \frac{D(t)}{[d(t)/2]^2} \quad (8)$$

$$\Psi(\theta > 0, \xi = 1) = 0 \quad (9)$$

$$D(t) = D(\Psi) = [d(t)/2]^2 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (10)$$

Difusividad promedio

$$D = \frac{\int_0^1 D(\Psi) d\Psi}{\int_0^1 d\Psi}$$



Soluciones de rehidratación [3,4]:  
 0 o 1 g NaCl/L  
 Temperatura: 65 o 98 °C  
 10 g solución / g muestra  
 t: 0 - 1600 min

**Resultados**

Los resultados mostraron que, a los 1600 s (25 min) del proceso, se alcanzaron valores de  $GA$  y  $PS$  que se situaron en intervalos de 0.634 - 1.603 g agua/g producto y 0.052 - 0.135 g sólidos/g producto (Fig. 1 y 2).

Los datos de cambio de tamaño del producto fueron descritos a partir de la variación del diámetro adimensional de las muestras de acuerdo con el modelo:  
 $d/d_0 = \Delta + (1 - \Delta)\Psi^m$  ( $R^2 = 0.70$ , Fig. 3), donde  $\Delta = 1.26$  (IC 95% = 1.24 - 1.27) y  $m = 1.07$  (IC 95% = 0.96 - 1.17). Al comparar las variaciones dimensionales entre cada tratamiento, se observa que los productos rehidratados por 25 min ( $\Psi = 0$ ) exhiben un incremento de 21 - 35% ( $p < 0.05$ ) respecto a su valor inicial ( $1.9 \pm 0.03 \text{ mm}$ ).

Finalmente, las difusividades promedio del agua en el producto rehidratado en soluciones con y sin NaCl a 98 °C (Tabla 1) fueron  $4.47 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $3.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectivamente. En el caso de las muestras rehidratadas a 65 °C las difusividades fueron de  $1.43 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $4.23 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  bajo las condiciones estudiadas.

Temp. (°C)	Conc. (g NaCl / L)	$D \times 10^{10} (\text{m}^2 / \text{s})^a$	$R^2$
98	1	4.47 (5.04 / 4.28)	0.994
98	0	3.65 (4.03 / 3.25)	0.993
65	1	1.43 (1.41 / 1.44)	0.915
65	0	4.23 (4.11 / 4.39)	0.950

<sup>a</sup> Los valores entre paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %.

**Conclusiones**  
 El análisis realizado permite contemplar las variaciones del tamaño de espagueti durante el proceso de rehidratación, describiendo adecuadamente la ganancia de agua con ayuda de un modelo difusivo de transferencia de masa. El efecto de la temperatura y del contenido de sal afecta las velocidades de transferencia de masa (agua y sólidos) y a las dimensiones de la pasta.

**Referencias**

- Rosentrater et al. Kent's Technol. C. (2018) 657-698.
- Benseddik et al. J Saudi Agric. Sci. 1 (2018) 1-9.
- Osawa et al. Food Bioproc. Tech. 7 (2013) 1465-1471.
- Da Silva et al. J. Agric. Stud. 3 (2015) 60-78.
- Ruiz-López et al. J. Food Eng. 108 (2012) 427-435.
- Aimoto et al. Food Sci. and Technol. 19 (2013) 17-22.
- Cunningham et al. J. Food Eng. 82 (2007) 600-607.



**Fig. 1. Cinética de ganancia de agua**



**Fig. 2. Cinética de sólidos perdidos**



**Fig. 3. Evolución del diámetro adimensional**

5. Guerrero Beltrán, J.A., **González-Pérez, J.**, Jiménez González, O., Recio, S.L. 2020. “Physicochemical and sensory analysis characteristics of inulin-xanthan gum, mesquite gum-carrageenan, and egg albumin-gelatin as replacers of gelatin in marshmallow”, IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.



# Certificate of Participation

This certifies that

**Julio E. González-Pérez**

poster attended

Physicochemical and Sensory Analysis Characteristics of Inulin-Xanthan Gum, Mesquite Gum-Carrageenan, and Egg Albumin-Gelatin as Replacers of Gelatin in Marshmallow

**Attended SHIF20® July 12-15, 2020 held virtually**


The IFT20 scientific and applied sessions qualify for Certified Food Scientist (CFS) recertification contact hours (CH). CFS Certificants may claim a maximum of 22 CH for their participation in scientific and technical symposia and poster sessions related to the CFS Content Domains.

IFT is a Continuing Professional Education (CPE) accredited provider (IN141) with the Academy of Nutrition and Dietetics' Commission on Dietetic Registration (CDR).

*Daniel Gullicksen*  
Daniel Gullicksen  
IFT Registration Meeting Planner



5. Guerrero Beltrán, J.A., **González-Pérez, J.**, Jiménez González, O., Recio, S.L. 2020. "Physicochemical and sensory analysis characteristics of inulin-xanthan gum, mesquite gum-carrageenan, and egg albumin-gelatin as replacers of gelatin in marshmallow", IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.



**Physicochemical and Sensory Characteristics of Inulin-Xanthan Gum, Mesquite Gum-Carrageenan and Egg Albumin-Gelatin as Replacers of Gelatin in Marshmallow**

**UDLAP**  
Contact Information:  
julio.gonzalezp@udlap.mx;  
angel.guerrero@udlap.mx

**INTRODUCTION**

Marshmallows are defined as tiny air bubbles surrounded by a matrix of sugar syrup and proteins (gelatin). The typical ingredients for making marshmallows are gelatin, sucrose, glucose syrup and water. However, due to the increasing demand for natural products, maintain the form and works as the gelling agent? New sources of hydrocolloids for the marshmallow productions are: inulin (from agave sap), xanthan gum (from *Xanthomonas campestris*), mesquite gum (from *Prosopis juliflora*), carrageenan (from the algae *Chondrus crispus*, called Irish moss) and egg albumin.

**AIM**

The objective of this study was to evaluate the effect of inulin-xanthan gum, mesquite gum-carrageenan and egg albumin-gelatin on the physicochemical and sensory characteristics of marshmallows reduced in gelatin.

**METHOD**

800g marshmallows  
40% sucrose  
10% glucose syrup  
10% water  
0.0005% citric acid

2% Gelling agent  
Gelatin  
Egg albumin and gelatin (1:1)  
Inulin and xanthan  
Egg albumin and Mesquite-carrageenan (1:1)

Whipping at 1000rpm/10 min

Form of marshmallows  
Control with corn starch  
Control with egg albumin

Marshmallows were a storage in plastic bags (multi-layer polyethylene at 12°C)

**Sensory analysis**

Sensory evaluation by 30-odd untrained consumers (ANOVA, Tukey test) for appearance, color, aroma, visual acceptability and general acceptability (Pearson correlation) and sensory attributes (SPSS 20.0)

**RESULTS**

**Marshmallows**

Marshmallows containing egg albumin had lower moisture content than control (gelatin). Gelatin (in control and partially reduced in formulation) increased the  $A_w$  of the products.

Sample	$A_w$	Moisture content (g/100 g)
Gelatin	0.690±0.0045*	15.40±0.81*
Egg albumin-gelatin	0.629±0.0072*	9.85±0.59*
Inulin-xanthan	0.632±0.0072*	10.15±0.59*
Mesquite-carrageenan	0.633±0.0200	8.44±0.20

Mean ± standard deviation. Different letters in the same column indicate significant difference ( $p < 0.05$ ).

**Color**

Lightness and chroma of marshmallows with gums were significantly different ( $p < 0.05$ ) than those for control. Hue of the mesquite gum-carrageenan formulation was the only different of all formulations.

Sample	$L^*$	$a^*$	$b^*$	Chroma	Hue	SE
Gelatin	95.91 ± 0.41*	-0.41 ± 0.19*	4.11 ± 0.13*	4.14 ± 0.12*	95.68 ± 2.53*	0.03 ± 0.07*
Egg albumin-gelatin	84.71 ± 0.37*	-0.44 ± 0.02*	6.51 ± 0.30*	6.52 ± 0.30*	90.86 ± 0.22**	2.68 ± 0.48*
Inulin-xanthan	86.44 ± 2.56*	-0.68 ± 0.13*	6.70 ± 1.39*	6.70 ± 1.39*	94.42 ± 0.15**	13.75 ± 0.56*
Mesquite-carrageenan	84.11 ± 0.52*	-0.03 ± 0.53**	11.11 ± 0.88*	11.12 ± 0.87*	90.28 ± 2.81*	10.67 ± 1.81*

Mean ± standard deviation. Different letters in the same column indicate significant difference ( $p < 0.05$ ).

**Texture**

**Table 3. Texture characteristics of marshmallows.**

Sample	Hardness (N)	Chewiness	Springiness	Chewiness/Gumminess
Gelatin	3.56±1.03*	0.49±	0.02*	0.69±0.18*
Egg albumin-gelatin	4.98±1.16*	0.21*	0.02*	0.55±0.17*
Inulin-xanthan	5.08±1.03*	0.16*	0.02*	0.32±0.09*
Mesquite-carrageenan	5.81±1.88*	0.14*	0.01*	0.45±0.06*

Mean ± standard deviation. Different letters in the same column indicate significant difference ( $p < 0.05$ ).

**CONCLUSIONS**

Mesquite gum-carrageenan and inulin-xanthan gum has a very good sensory appearance and can be used for making marshmallows. The use of inulin-xanthan gum and mesquite gum-carrageenan products for replacing gelatin in the marshmallow production.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

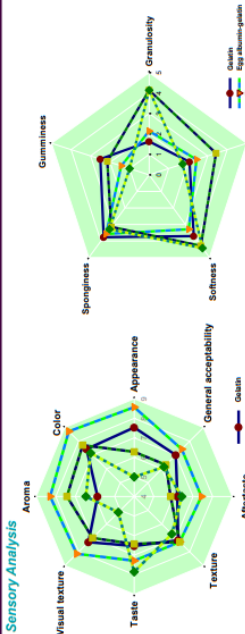
González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O. and Recio-Cázar, S.L. thank to Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for providing the financial support to complete their Ph.D. studies and to Ph.D. Guerrero-Beltrán for all the time and support to this project.

**REFERENCES**

- Kita, E., Aydogdu, A., Oztop, M.H. (2017). Investigation of physical properties and moisture sorption behaviour of different marshmallow formulations. *Adv Horticulturae*, 11(2), 245-246. doi:10.17680/advhort.2017.11.2.3
- Guerrero Beltrán, J.A., González-Pérez, J., Jiménez-González, O., Recio-Cázar, S.L. (2020). Sensory and textural characteristics of marshmallows produced with inulin-xanthan gum, mesquite gum-carrageenan and egg albumin-gelatin as replacers of gelatin. *Food Science and Technology* 83(1), 605-612. doi:10.1016/j.fst.2014.12.024
- Ungure, E., Strumile, E., Mulhince-Brasava, S., Dubalska, L. (2013). Consumer Attitude and Sensory Evaluation of Marshmallow. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 67(4-5), 442-447. doi:10.2478/probs-2013-0077

**RESULTS**

**Sensory Analysis**



**Fig. 3.** Radar chart illustration of the sensory characteristics of marshmallows evaluation by hedonic scale.

**Table 4.** Pearson correlation of the sensory characteristics of marshmallows evaluation by hedonic scale.

General acceptability	Appearance	Softness	Color	Springiness	Granulosity	Moisture	Alterate	Gumminess	Texture
1	0.59*	0.54*	0.59*	0.54*	0.59*	0.54*	0.59*	0.54*	0.59*
Appearance	1	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*
Softness	0.49*	1	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*
Color	0.49*	0.59*	1	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*
Springiness	0.37*	0.37*	0.37*	1	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*
Granulosity	0.33*	0.33*	0.33*	0.33*	1	0.71*	0.71*	0.71*	0.71*
Moisture	0.26*	0.26*	0.26*	0.26*	0.26*	1	0.71*	0.71*	0.71*
Alterate	0.20*	0.20*	0.20*	0.20*	0.20*	0.20*	1	0.71*	0.71*
Gumminess	0.17*	0.17*	0.17*	0.17*	0.17*	0.17*	0.17*	1	0.71*
Texture	0.15*	0.15*	0.15*	0.15*	0.15*	0.15*	0.15*	0.15*	1

\* Statistical significance (in bold)  $p < 0.05$ .

**REFERENCES**

- Kita, E., Aydogdu, A., Oztop, M.H. (2017). Investigation of physical properties and moisture sorption behaviour of different marshmallow formulations. *Adv Horticulturae*, 11(2), 245-246. doi:10.17680/advhort.2017.11.2.3
- Guerrero Beltrán, J.A., González-Pérez, J., Jiménez-González, O., Recio-Cázar, S.L. (2020). Sensory and textural characteristics of marshmallows produced with inulin-xanthan gum, mesquite gum-carrageenan and egg albumin-gelatin as replacers of gelatin. *Food Science and Technology* 83(1), 605-612. doi:10.1016/j.fst.2014.12.024
- Ungure, E., Strumile, E., Mulhince-Brasava, S., Dubalska, L. (2013). Consumer Attitude and Sensory Evaluation of Marshmallow. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 67(4-5), 442-447. doi:10.2478/probs-2013-0077

6. Guerrero Beltrán, J.A., Jiménez González, O., **González-Pérez, J.**, Recio, S.L. 2020. “Vanilla ice cream with *Lactobacillus rhamnosus* as a source of probiotics added before and after maturation”, IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.



# Certificate of Participation

This certifies that

**Julio E. González-Pérez**

poster attended

Survival, physicochemical and sensory changes of *Lactobacillus rhamnosus* addition to vanilla mixture ice-cream


**Attended SHIF20® July 12-15, 2020 held virtually**

The IFT20 scientific and applied sessions qualify for Certified Food Scientist (CFS) recertification contact hours (CH). CFS Certificants may claim a maximum of 22 CH for their participation in scientific and technical symposia and poster sessions related to the CFS Content Domains.

IFT is a Continuing Professional Education (CPE) accredited provider (IN14) with the Academy of Nutrition and Dietetics' Commission on Dietetic Registration (CDR).

*Daniel Gullicksen*  
Daniel Gullicksen  
IFT Registration Meeting Planner


6. Guerrero Beltrán, J.A., Jiménez González, O., González-Pérez, J., Recio, S.L. 2020. "Vanilla ice cream with *Lactobacillus rhamnosus* as a source of probiotics added before and after maturation", IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.



Survival, physicochemical and sensory changes of *Lactobacillus rhamnosus* addition to vanilla mixture ice-cream

Jiménez-González, O. <sup>1</sup>, González-Pérez, J. E. <sup>1</sup>, Recio-Cázares, S. L. <sup>1</sup> & Guerrero-Beltrán, J. A. <sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Food Sciences Doctorate Program, Department of Chemical, Food and Environmental Engineering, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México.

Contact Information:  
 angel.guerrero@udlap.mx  
 oscar.jimenezgz@udlap.mx



### INTRODUCTION

Probiotics have been associated to several benefits in human health<sup>1</sup>. *Lactobacillus rhamnosus* has shown several characteristics: the ability to survive in acid environments, colonize guts, antimicrobial substance production and rapid growth rate<sup>2</sup>. In addition, dairy products could be a way to ingest probiotics, and its consumption is very common<sup>3</sup>. However, the freezing processing affects the availability of probiotics, because they are subjected to stress. In addition, the addition of probiotics could change the sensory attributes in the final product due to the production of some compounds.

### AIM

The objective of this work was to see the effect of the addition of probiotics before and after maturation as well as during freezing and storage.

### METHOD

- Bacteria culture**
  - L. rhamnosus* was grown in skimmed milk (40%) for 24 h in a shaking bath (37 °C/180 rpm).
  - Cell suspension was centrifuged by centrifugation (4500 g/10 min/4 °C), final concentration was 3.85x10<sup>8</sup> c.f.u./g.
- Bacteria biomass**
  - Bacterial culture (10% of the final mature) was added 24 h before and 0 h after maturation to vanilla ice-cream mixture (Fig. 1)
- Ice-cream formulation**
  - The ice-cream mixture contained heavy cream (13.3%), sugar (40%), salt (0.1%), protein (1.5%), CMC, Casein (1.1%), 0.04% of 80 °C and vanilla (0.2 %). All ingredients were mixed in a blender at high speed 0.5x10<sup>3</sup> C/U/g.
  - The mixture was placed in 100 g/100 g polyethylene bags and then cooled down at 4 °C.
- Analysis**
  - Before freezing pH, acidity and bacteria counts and bacteria counts were performed.
  - Freeze ice-cream was analyzed in bacteria counts and sensory evaluation.
  - Paired comparison and 9-point hedonic (difficulties) after one week of storage.

### RESULTS

Results showed that the bacterial mature maturation, increased the number of bacteria from 7.71x10<sup>7</sup> to 8.43x10<sup>8</sup> c.f.u./g. It is important to say that bacteria passed through different stress conditions such as different pH, high osmotic environment due to the sugar and other solids ingredients<sup>4</sup>.

As a result, temperature and oxygen decreased the viable bacteria counts, mainly in the ice cream after 24 h of the bacteria addition.




Fig 1. Ice-cream.

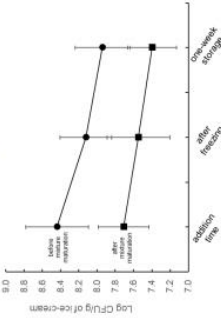


Fig 2. *Lactobacillus rhamnosus* counts after addition, after freezing and after one week of storage.

### CONCLUSIONS

The ice cream with probiotics had a good concentration of viable bacteria and could be a good source of probiotics. The addition time of probiotic to the ice cream mixture is important because can affect the chemical and sensory characteristics: lactic acid increased and sensory characteristics improved.

### ACKNOWLEDGEMENTS

Authors Jiménez-González O., González-Pérez J.E., Recio-Cázares, S.L. thanks to Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) and to Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACyT) scholarship granted to complete their Ph.D. studies.

### REFERENCES

- George Leary, B. Faria, J. K. Goudo, S. Park, Y. Shin, H.-S. & Dos, G. (2018). Benefaction of probiotics for human health: A review. *Journal of Food and Drug Analysis*, 26(3), 927-937. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.01.002>
- Gottschalk, S., Doron, S., & Megaro, F. (2017). *Lactobacillus* in the Microbiome of the Gut. *Current Gut and Esophageal Pathophysiology*, 7(7-8), 37-86.
- Čadež, H. L., Demirci, T., & Alan, N. (2018). Production of functional probiotic ice creams with white and dark blue pigments and their effect on the chemical, microbiological, and sensory characteristics of *Lactobacillus casei* 431 and functional characteristics. *LWT*, 90, 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.048>
- Mohammads, R., Moradian, A. M., Khorshohfar, R., & Ghobadipour, M. (2011). Production of vanilla ice cream: Effect of probiotic, lactated and vanillin. *Proprietary Annals of Microbiology*, 6(18), 411-424. <https://doi.org/10.1007/s13131-011-0188-3>
- Cruz, A. G., Afunes, A. E. C., Sousa, A. L. O. F., Faria, J. A., & Saad, W. L. (2009). Ice-cream as a probiotic carrier. *Food Science and Technology*, 24(1), 1235-1239. <https://doi.org/10.1545/foodsc.2009.24.01.1235>

### Table 1. Physicochemical characteristics ice creams with probiotics at different maturation addition times.

Sample	pH	Characteristics* Density (g/cm <sup>3</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Ice cream mature	6.40 ± 0.014 a	0.215 ± 0.013 a	1.087 ± 0.007 a
Bacteria added before maturation period	6.29 ± 0.024 a	0.264 ± 0.033 b	1.077 ± 0.024 a
Bacteria added after maturation period	6.04 ± 0.028 a	0.305 ± 0.005 a	1.077 ± 0.003 a

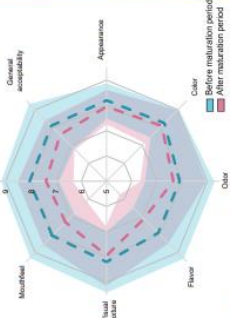
\*Values expressed in mean ± standard deviation. a, b c Different letters at the same column mean significant difference (p < 0.05).

### Table 2. Color parameters of ice cream with probiotics.

Sample	L*	a*	b*	Chroma	Hue
Bacteria added before maturation period	74.68 ± 3.57 b	-2.32 ± 0.20 a	11.66 ± 0.72 b	11.89 ± 0.75 b	101.23 ± 0.32 a
Bacteria added after maturation period	90.07 ± 1.21 a	-2.98 ± 0.03 b	13.32 ± 0.41 a	13.65 ± 0.41 a	102.64 ± 0.24 a

\*Mean ± standard deviation. Different letters at the same column indicates significant differences (p < 0.05).

### Table 3. Sensory evaluation characteristics, tasted by hedonic scale, of ice creams with probiotics.



The sensory evaluation (Fig. 3) did not show differences between the samples in all characteristics; however, both types of ice cream were highly accepted by the untrained judges. The paired comparison test showed that judges preferred the samples with bacteria addition 24 h before freezing, due to a slight sour taste.

7. Guerrero Beltrán, J.A., Recio, S.L. Jiménez González, O., **González-Pérez, J.**, 2020. “Physicochemical and sensory characteristics of cookies elaborated with residues of chia oil extraction”, IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.



# Certificate of Participation

This certifies that

**Julio E. González-Pérez**

poster attended

Physicochemical and Sensory Characteristics of Cookies Elaborated With Residues of Chia Oil Extraction


**Attended SHIFT20® July 12-15, 2020 held virtually**

The IFT20 scientific and applied sessions qualify for Certified Food Scientist (CFS) recertification contact hours (CH). CFS Certificants may claim a maximum of 22 CH for their participation in scientific and technical symposia and poster sessions related to the CFS Content Domains.

IFT is a Continuing Professional Education (CPE) accredited provider (N141) with the Academy of Nutrition and Dietetics' Commission on Dietetic Registration (CDR).

*Daniel Gullicksen*  
Daniel Gullicksen  
IFT Registration Meeting Planner


7. Guerrero Beltrán, J.A., Recio, S.L. Jiménez González, O., **González-Pérez, J.**, 2020. “Physicochemical and sensory characteristics of cookies elaborated with residues of chia oil extraction”, IFT20, Poster, Chicago, IL. USA.



**SHIF20**

**Physicochemical and sensory characteristics of cookies elaborated with residues of chia oil extraction**

Recio-Cázarez, S.L., Jiménez-González, O., González-Pérez J.E and Guerrero-Beltrán, J.A  
Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Universidad de las Américas Puebla, Sta. Catarina Mártir SN, Cholula, Puebla, CP. 72810 México.



Contact information: [scarlette.recios@udlap.mx](mailto:scarlette.recios@udlap.mx) [angel.guerrero@udlap.mx](mailto:angel.guerrero@udlap.mx)

### INTRODUCTION

The chia (Salvia hispanica) seed is a good source of protein and dietary fiber. The consumption of chia dietary fiber could be an important alternative to improve the nutritional quality of bakery products. Chia oil extraction, consumed as a snack, could contribute to add economic value to consumers food products and benefit the producers to increase their profits; hence, lowering the oil extraction chia waste (unutilized).

### AIM

The objective of this research was the use chia residues as a source of fiber and protein to produce high value nutrient cookies with good sensory acceptability.

### METHOD

Chia oil and residue were used for making cookies. The formulations (25, 50, 75 and 100% of chia residues) were prepared with wheat flour. The cookies were prepared with the following ingredients: wheat flour, sugar, butter, eggs, vanilla, and salt. The cookies were prepared with the following ingredients: wheat flour, sugar, butter, eggs, vanilla, and salt. The cookies were prepared with the following ingredients: wheat flour, sugar, butter, eggs, vanilla, and salt.

### RESULTS

Chia cookies




Fig. 1. Chia cookies (1) 25% chia flour, (2) 50% chia flour, (3) 75% chia flour, (4) 100% chia flour.

**Proximal analysis**

Cookies containing chia residue showed an increase in protein, fiber, and sodium, compared to the control (0% chia).

SAMPLE	Moisture	Ashes	Fat	Protein	Fiber	Ca	Fe	Na	Moisture	Protein	Fiber	Ca	Fe	Na
0% chia	4.86±0.04	0.50	6.50	6.37	2.87	0.008	0.33	0.10	33.17±0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25% chia	1.52±0.03	0.30	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50% chia	4.83±0.08	1.33	11.08	11.77	3.58	0.039	0.39	0.10	33.17±0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75% chia	4.83±0.08	1.33	11.08	11.77	3.58	0.039	0.39	0.10	33.17±0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100% chia	4.83±0.08	1.33	11.08	11.77	3.58	0.039	0.39	0.10	33.17±0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Statistical means with different letters are significant difference at 95% of confidence level.

**Color**

Lightness, hue and color saturation were significantly different (p<0.001) in cookies with chia residue.

SAMPLE	L*	a*	b*
0% chia	52.87±0.12	1.61±0.02	16.43±0.20
25% chia	42.58±1.49	1.44±0.32	13.97±0.90
50% chia	39.51±0.57	1.71±0.02	9.24±0.89
75% chia	32.67±0.30	1.83±0.02	9.22±1.02

Statistical means with different letters are significant difference at 95% of confidence level.

**Hardness analysis**

All the formulations of cookies with chia residue had a lower hardness than the control samples.

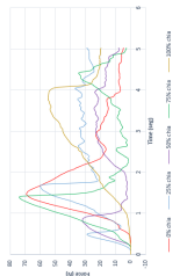


Fig. 2. Compression test of chia cookies.

### CONCLUSIONS

In general, the sample containing 25% chia flour and 75% wheat flour was the best accepted in all parameters evaluated. Residues of chia oil extraction have a high protein and fiber content, they can be used for making food products, such as cookies, substituting flours of wheat, oat and rice. Consumers may have health benefits with the consumption of chia products.

### ACKNOWLEDGEMENTS

Recio-Cázarez, S.L., Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E. thank to Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) and to Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship granted to complete their Ph.D. studies.

### REFERENCES

- Alfredo, V.O., Gabriel, R.R., Luis, C.G., & David, B.A. (2009). Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia (Salvia hispanica L.). *LMV - Food Science and Technology*, 21(1), 168-173.
- Lucas-González, R., Vidua-Martos, M., Pérez-Ahrens, J. A., & Rodríguez-García, J. M. (2017). Physicochemical and sensory characteristics of Mediterranean fruit-based extruded International *Journal of Food Science & Technology*, 51(12), 2674-2681.
- Soukoulis, C., Galani, C., & Hoffmann, L. (2018). Plant seed mucilage as emerging biopolymer in food industry applications. *Current Opinion in Food Science*, 22, 28-42.

8. Jiménez González, O., Reyes-Jurado, F., **González-Pérez, J.**, 2021. “Inhibición de *Salmonella typhi* utilizando extractos acuosos de semilla de *Renalmia alpina*”, 4to Congreso Internacional de Alimentos Funcionales (Alfanutra), Modalidad virtual.

**Cuarto Congreso Internacional Digital de Alimentos Funcionales y Nutraceuticos**

La Red de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico en Alimentos Funcionales y Nutraceuticos otorga el presente

**RECONOCIMIENTO** a:

**Jiménez-González O, Reyes-Jurado F, González-Pérez JE**

Por su valiosa participación en la modalidad de **presentación de cartel** dentro de la categoría “Aprovechamiento de Subproductos”, con el tema **Inhibición de *Salmonella typhi* utilizando extractos acuosos de semilla de *Renalmia alpina*** en el marco del 4º Congreso Internacional Digital en Alimentos Funcionales y Nutraceuticos: 2020 Rumbo al 2021, realizado del 10 al 12 de junio del 2020

Comité técnico/científico


Abraham Wall Medrano  
Liliana Santos Zea  
Adrián Hernández Mendoza

ALIMENTOS FUNCIONALES Y NUTRACEUTICOS  
CONACYT  
CIAD  
Tecnológico de Monterrey

8. Jiménez González, O., Reyes-Jurado, F., **González-Pérez, J.**, 2021. “Inhibición de *Salmonella typhi* utilizando extractos acuosos de semilla de *Renalmia alpina*”, 4to Congreso Internacional de Alimentos Funcionales (Alfanutra), Modalidad virtual.

UDLAP

## INHIBICIÓN DE *Salmonella typhi* UTILIZANDO EXTRACTOS ACUOSOS DE SEMILLA DE *Renalmia alpina*



*Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., Reyes-Jurado, F.\**  
 \* Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Ex Hacienda Sta. Catarina Mártir S/N. San Andrés Cholula, Puebla. C.P. 72810. México. fatima.reyes@udlap.mx.

### Resumen


La mayoría de los agentes antimicrobianos son de origen sintético, los cuales presentan peligros a la salud humana, por lo cual, la industria se ha inclinado al uso de aditivos para el control microbiano de origen natural. En este trabajo, se investigó el uso de extractos de semillas de *Renalmia alpina*, contra el crecimiento de *Salmonella typhi*. Los extractos fueron adicionados al agar de cultivo en diferentes concentraciones, encontrando que concentraciones 40% inhibieron el crecimiento de *S. typhi*, se encontró una reducción de  $8.58 \pm 0.01$  hasta  $5.23 \pm 1.34$  Log UFC/mL, mientras que no se encontraron diferencias significativas con el uso de 5% y 20% de extracto de semilla de *R. alpina*.

### Introducción

Los recursos naturales en zonas de bajos recursos son bastos [1], sin embargo, muchos de estos son desaprovechados, por otro lado se ha empleado el uso de diferentes extractos como conservadores naturales debido a su inherente demanda [2], extractos de hierbas, especias o aceites esenciales [3]. *Salmonella typhi* se ve implicada en enfermedades fiebre tifoidea, septicemia o gastroenteritis [4], además, debido a que los microorganismos se han vuelto cada vez más resistentes a diferentes medicamentos [5], la búsqueda de diferentes compuestos para la inhibición de *S. typhi* ha aumentado.

*Renalmia alpina* (Rottb.) Mass (Zingiberaceae), su consumo es local y limitado a la pulpa, sin embargo, las semillas son desechadas después de la remoción de la pulpa, no obstante, debido a su aroma pungente e intenso, podría contener múltiples compuestos antibacterianos, ya que se ha estudiado extractos etanólicos de los rizomas de la planta contra el crecimiento de *Leishmania amazonensis* [6].

### Metodología



### Resultados

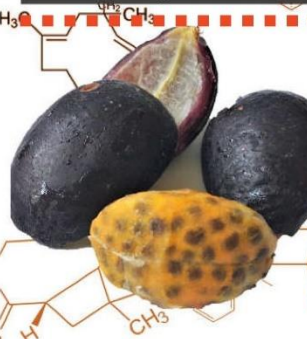
En la Figura 1, se observa la apariencia del fruto, de esta el 22.74% aproximadamente esta constituido por semillas, las cuales son desechadas, se han reportado muy pocos usos para la semilla, dentro de estos destaca la extracción de aceite de las semillas usado para fritura, como remedio medicinal contra náuseas y vómitos [7]. Por otro lado, el uso de diferentes extractos ha sido propuesto como agentes antimicrobianos, como semillas de toronja [8] y papaya [9], los resultados (Figura 2) mostraron una reducción de más de 3 Log (UFC/mL), con el uso del extracto al 40%, sin embargo, no fueron significativos para las otras dos concentraciones. Esta reducción podría atribuirse a la concentración de compuestos antimicrobianos en el extracto, a que fue la mas alta, Gomez-Betancur et al. [10] reportan que uno de los principales constituyentes de aceite esencial de *R. alpina* es  $\alpha$ -Pinoeno, el cual se ha comprobado tener un efecto antimicrobiano [11].

### Referencias

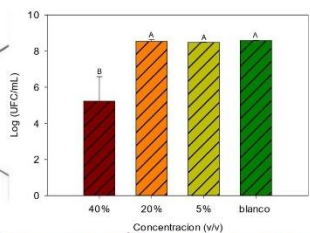
1. Padua, A. C. (1997). J. Antimicrob. Chem. 39, 1133-1134.
2. Tran, B. K., Vichitranon, V. P., Donsil, C. P., Mahakhamrasri, K., Saisak, P. & Cullen, P. J. (2009). Application of natural antimicrobials for food preservation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57, 5907-5908.
3. Weenkoddy, N.R., Caffin, N., Lancher, L.K., Tamer, M.S. & Dykes, G.A. (2010). Synergistic antimicrobial activity of galangal (*Alpinia galanga*), rosemary (*Rosmarinus officinalis*) and lemon balm (*Monarda citriodora*) extracts. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91 (3), 461-468.
4. Davis, A.T., Prabhu, B. & Noshadpour, (2016). Study of Antimicrobial Activity of Black Cumin Seed Oil against *Salmonella typhi* in vitro. *Journal of Medical & Surgical Pathology*, 1, 114.
5. Corbin, M.M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Review* 12, 564-582.
6. Cifuentes, N., Ahsan, T., Bae, D., Jeong, A., Yano, E., Aguayo, L.E. & Casarave, B. (2009). Medicinal plants from the Yareña (Peru): Evaluation of the antimicrobial and immunomodulatory activity of selected extracts. *Journal of Ethnopharmacology* 123, 413-422.
7. Macia, M.J. (2012). *Renalmia alpina* (Rottb.) Mass (Zingiberaceae): its edible plant from Sierra Norte de Puebla (Mexico). *Acta Horticulturae Acta Horticulturae de México* 66, 115-117.
8. Ovtsov, Z., Vladimirov-Kazarev, S. (2001). Antimicrobial activity of grapefruit seed and pulp ethanol extract. *Pharmazie* 56, 245-246.
9. Khan, P.I., Khan, Y., Paudyal, P., Maith, H. (2014). Antimicrobial Activity of Seed and Leaf Extract of Citrus Popayana. *Plant and Animal Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 9, 29-37.
10. Gomez-Betancur, L., Benjamins, D., Gomez, J.E., Mejia, N., Leon, J.F. (2018). Antimicrobial Activity of Citrus Peel Oil, Geraniol and Monoterpenoid Nerve of *Renalmia alpina* (Rottb.) Mass. *Research of Natural Products*.
11. de Silva, A.C.R., Lopez, P.M., de Azevedo, M.M.B., Costa, D.C.M., Alvim, C.S. & Alvim, D.S. (2012). Biological Activities of  $\alpha$ -Pinene and  $\beta$ -Pinene Enantiomers. *Molecules*, 17, 6305-6316.

### Conclusiones

Este estudio demuestra la efectividad de extractos de *R. alpina* para la inhibición de *S. typhi*, por lo cual, debido a su desaprovechamiento, podría ser una fuente importante de antimicrobianos para la industria alimenticia, no obstante, se requieren más estudios acerca de la composición exacta de las semillas, así como métodos de extracción del aceite para evaluar la completa inhibición de los microorganismos.



**Figura 1. Fruto de *Renalmia alpina***



**Figura 2. Crecimiento microbiano después de la adición de extractos de semilla de *Renalmia alpina***

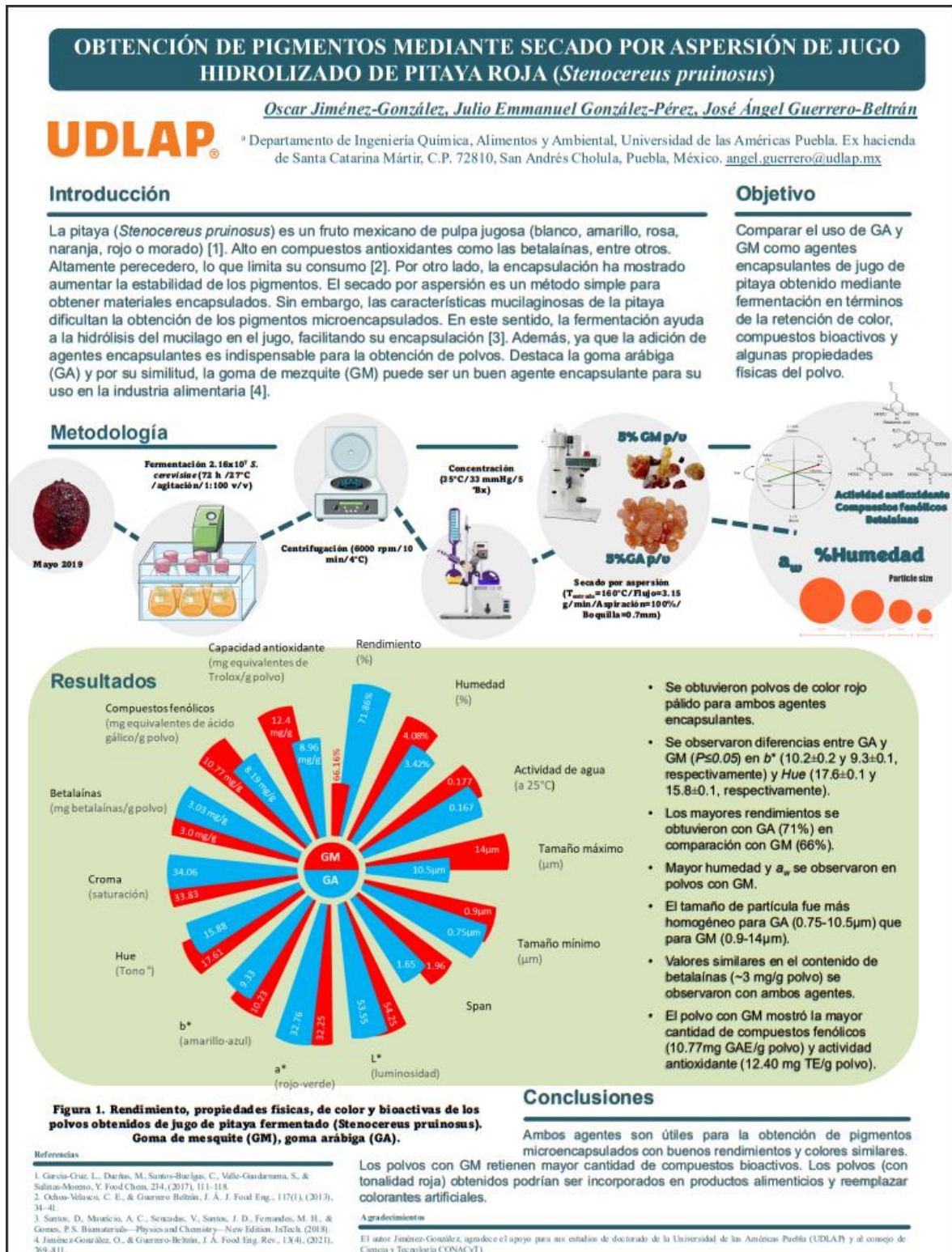
Concentración (v/v)	Log (UFC/mL)
40%	~5.23
20%	~8.58
5%	~8.58
blanco	~8.58

9. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, Guerrero-Beltrán, J. Á. 2022. “Obtención de pigmentos mediante secado por aspersión de jugo hidrolizado de pitaya roja (*Stenocerus pruinosus*)”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster. Puerto Vallarta, Jalisco, México.

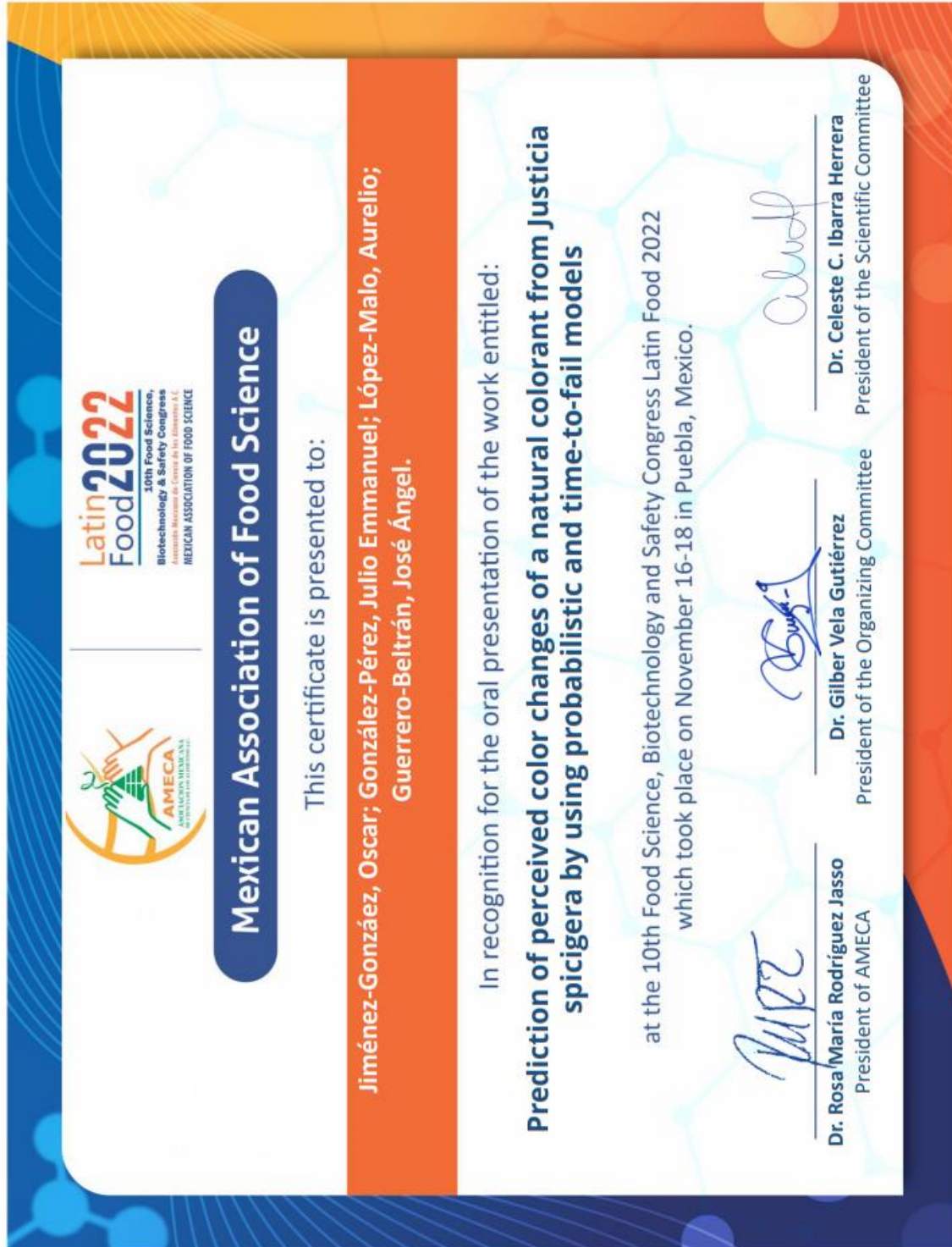





9. Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., Guerrero-Beltrán, J. Á. 2022. “Obtención de pigmentos mediante secado por aspersión de jugo hidrolizado de pitaya roja (*Stenocercus pruinosus*)”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster. Puerto Vallarta, Jalisco, México.




10. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, López-Malo, A. 2022. “Prediction of perceived color changes of a natural colorant from *Justicia spicigera* by using probabilistic and time-to fail models, Latin Food 2022. Poster. Puebla, Pue. México.




10. Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., López-Malo, A. 2022. "Prediction of perceived color changes of a natural colorant from *Justicia spicigera* by using probabilistic and time-to fail models, Latin Food 2022. Poster. Puebla, Pue. México.



10th Food Science,  
Biotechnology & Safety Congress





## Prediction of perceived color changes ( $\Delta E$ ) of a natural colorant from *Justicia spicigera* by using probabilistic and Time-to-Fail models

Jiménez-González, O.<sup>1\*</sup>, González-Pérez, J. <sup>1</sup>, López-Malo, A.<sup>1</sup>, Ramírez-Corona, N., Guerrero-Beltrán, J.A.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, San Andrés Cholulá, Puebla, México. Email: oscar.jimenezgz@udlap.mx


### Introduction

*Justicia spicigera* leaves have been used since pre-Hispanic times for coloring fabrics, codices, murals, crafts [1].

Leaves decoction generates a violet color because anthocyanins' presence and change color due to pH [2,3].

Recently, *J. spicigera* pigments have been used as a colorant in corn tortillas, yogurt, and jellies [4,5].

Survival analysis could accurately establish the time when a product is rejected. Probabilistic models estimate the probability of acceptance/rejection based on the time to reach a certain value [6].



### Objective

This study aimed to model the Time-to-Fail (TTF) of *J. spicigera* pigments during heating at different temperatures and pH levels, according to the change in color ( $\Delta E$ ), and the probability of its occurrence.

### Materials and Methods

**Pigment extraction**  
Maceration of dry leaves 0.3g; 25mL ethanol ratio/2h; centrifugation 450 rpm/ 4°C/ 15 min; rotatory evaporator concentration 45°C/ 54 mmHg until 1/3 of initial volume

**Lyophilization**  
Liquid concentrated pigment + MDX (5%); frozen -80°C/ 24h; lyophilized 0.133 mmHg/ 48 h; grinded

**pH adjust**  
0.01 or 0.002 g/ml dispersed in McIlvaine buffer at 2, 4, 6, 8, 10 and 12 pH (citric acid 0.01M or NaOH 1M) in sealed tubes

**Heat treatment**  
Solutions were heated at 40, 60 or 80°C during 8h, taking samples every hour

**Color determination**  
Determined spectrophotometrically [7]. Converted to L\*, a\* and b\*

$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$

**Time-to-Fail (TTF) and probabilistic modeling**  
TTF and probabilistic was modeled using classified values: 1 or F when  $\Delta E > 4$  and 0 or C when no changes were observed.  
 $\ln(TTF) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 xy + \beta_4 x^2 + \beta_5 y^2$   
 $f(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_1 x_3 + \beta_6 x_2 x_3$   
 $p(x) = \frac{\exp(f(x))}{1 + \exp(f(x))}$        $\ln\left(\frac{p(x)}{1-p(x)}\right) = f(x)$

### Results and Discussion

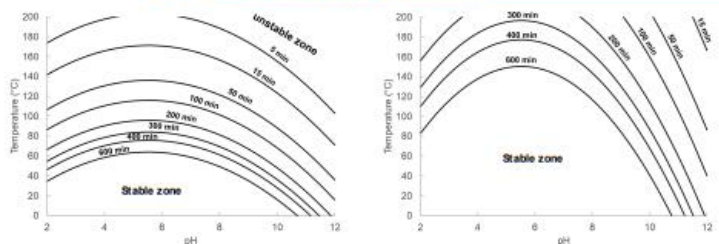


Figure 1. Time to color fail at different pH, temperatures and concentration

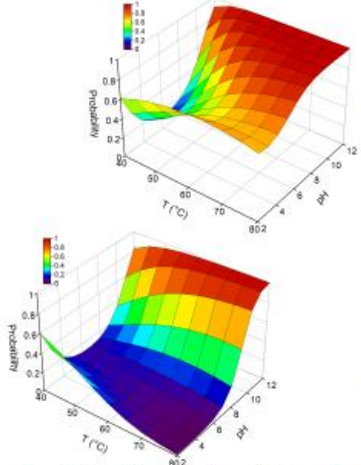


Figure 2. Probability of color loss or  $\Delta E$  change, at different pH, temperature and concentration

Both TTF ( $R^2=0.800$ ) and probabilistic models accurately predicted the color changes.

Failure time decreases with increasing pH, especially at 80°C; the neutral pH region is the most stable region regardless of temperature (Figure 1).

pH 4 to 8 requires at least 600 min at 50°C to exhibit a  $\Delta E > 4$ .

With decreasing in colorant concentration, the changes are less noticeable.

Increasing temperature, the time to present a color change decreases.

The same trend is observed in the probabilistic model; high pH values and temperatures increase the probability of presenting  $\Delta E > 4$  (Figure 2).

While near to neutral pH region, it is less probable to colorant fail.

### Conclusion

TTF and probabilistic models allowed to predict an ingredient's behavior like colorants during the thermal process.

### Acknowledgments

Authors Jiménez-González thanks to Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) and the National Council for Science and Technology (CONACYT) of Mexico for the financial support for their Ph.D. studies.

### References

[1] Baqueiro-Peña et al., 2017. Food Chemistry, 218, 305-312. [2] Awad et al., 2015. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 7, 91-96. [3] Khoo et al., 2017. Food & Nutrition Research, 61, 1361779. [4] Alvarez-Poblano et al., LWT, 133, 110120. [5] Castro-Alatorre et al., 2021, Foods, 10, 1-16. [6] Kosegarten et al., 2022. Journal of Food Processing and Preservation, e16548. [7] APHA, (American Public Health Association) et al., (1992). American Public Health Association.

11. Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., y López-Malo, A. 2021. “Predicción de la supervivencia de *Aspergillus flavus*: modelo probabilístico y tiempo de falla”, XXIII Congreso Internacional de Inocuidad de Alimentos, Poster, Modalidad Virtual.

**XXXIII Congreso Internacional**  
**Inocuidad de Alimentos**  
XXXVIII Reunión Nacional de Microbiología, Higiene y Toxicología de los Alimentos  
Edición Online 4, 5 y 6 de noviembre 2021

La Universidad de Guadalajara otorga la presente  
**CONSTANCIA**

Universidad de Guadalajara

CUCEI

A: Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., y López-Malo, A.

por su participación como:  
Autores del trabajo libre presentado en modalidad cartel  
"Predicción de la supervivencia de *Aspergillus flavus*: modelo probabilístico y tiempo de falla"


*Ruth Padilla Muñoz*  
Dra. Ruth Padilla Muñoz  
Rectora del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías

*Óscar Blanco Alonso*  
Dr. Óscar Blanco Alonso  
Secretario Académico del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías

11. Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., y López-Malo, A. 2021. “Predicción de la supervivencia de *Aspergillus flavus*: modelo probabilístico y tiempo de falla”, XXIII Congreso Internacional de Inocuidad de Alimentos, Poster, Modalidad Virtual.

### INTRODUCCIÓN

La microbiología predictiva relaciona el control y manipulación de alimentos con la seguridad y calidad de los mismos. Para ello, utiliza modelos matemáticos a partir de datos experimentales que describen o estiman parámetros biológicos como la velocidad de crecimiento, el tiempo de latencia, la velocidad de inactivación, entre otros [1].



### Metodología


**Datos experimentales** → aw: 0.95 o 0.99; pH: 3.5 o 4.5; Eugenal: 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 ppm

**Regresión logística** → Crecimiento "1" (Cuando no se observo crecimiento "0")

$$p(x) = \frac{\exp(\sum \beta_i X_i)}{1 + \exp(\sum \beta_i X_i)}$$

**Regresión de tiempo de falla** → Crecimiento "1" (Cuando no se observo crecimiento "0" después de 1440 h "c")

$$\ln[TTD(x)] = \beta_0 + \sum \beta_i X_i$$



### RESULTADOS PARCIALES

Tabla 1. Coeficientes de los polinomios para el modelo de regresión logística y tiempo de falla.

Variable	Modelo de regresión logística	Tiempo de falla
Intersección	1.674E-06	0.99
pH	0.68373	0.10
ppm	-0.12	2.92
aw, pH	-303.92	-0.13
aw, ppm	-1.54E-12	-
pH, ppm	2.26E-14	-

\*Signo de variable normalizada.

- El modelo describe los datos experimentales satisfactoriamente (Tabla 2).
- Las interacciones en el modelo logístico no fueron significativas pero se mantuvieron para el cálculo de la probabilidad.
- El modelo predice el crecimiento/no crecimiento y aw (Figura 1a).
- La probabilidad de crecimiento aumenta con el pH y aw (Figura 1a).
- Se observó crecimiento cuando eugenol se agregaba entre 0 a 400 ppm.
- No se observó crecimiento en concentraciones de 550 a 1000.
- Los valores críticos de eugenol aumentan a valores altos de aw y bajos de pH (Tabla 2).
- La concentración disminuye con la probabilidad.
- Las concentraciones críticas se encuentran entre 468.1 a 567.9 ppm.

### CONCLUSIONES

- Los modelos logístico y tiempo de falla son útiles para conocer las condiciones de crecimiento de *A. flavus* en las cuales eugenol a las cuales *A. flavus* puede crecer o no crecer. Además, es posible que conociendo el tiempo al cual *A. flavus* puede crecer, podamos extrapolarse a alimentos reales. Por otro lado, es necesaria la adición de eugenol para reducir el tiempo de germinación de *A. flavus*, o de ser necesario agregar por lo menos 600 ppm para extender la fase lag más de 1,400 h.

### AGRADECIMIENTOS

Oscar Jiménez-González agradece a la UDLAP y al CONACYT por el financiamiento para sus estudios de posgrado.

Contacto:  
oscar.jimenez@udlap.mx

### REFERENCIAS


[1] González, Pinar, Germán, Valeria, Sofía, Paula, Susana, Gerardo, Guzmán, Zoraida, Pérez, Oscar, 2019. "Modelos matemáticos para la predicción de la supervivencia de *Aspergillus flavus* en alimentos". *Revista Colombiana de Microbiología and Inocuidad de Alimentos*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-10. <https://doi.org/10.15446/rmic.1001>

[2] Eyring, Henry, 1972. "Activation energy for chemical reactions and solutions". *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-10.

[3] Eyring, Henry, 1972. "Activation energy for chemical reactions and solutions". *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-10.

### CONCLUSIONES

Debido a lo anterior el objetivo de este trabajo es presentar los modelos probabilísticos que describen la influencia de la aw, pH y la concentración de eugenol en el tiempo de germinación de *A. flavus*.



### RESULTADOS PARCIALES

Tabla 2. Valores críticos de eugenol a las combinaciones de aw y pH seleccionadas y puntos centrales a diferentes niveles de probabilidad.

aw	pH	P = 0.1	P = 0.5	P = 0.9
0.95	4.5	468.1	450.1	433.1
0.95	3.5	468.1	450.1	433.1
0.99	4.5	468.1	450.1	433.1
0.99	3.5	567.9	549.9	531.9
0.97	4.0	493.1	475.1	457.0

### CONCLUSIONES

El modelo de tiempo de falla (Tabla 1) presenta un buen ajuste (Figura 2). La interacción aw-pH fue significativa. El tiempo de germinación aumenta en concentraciones más altas de eugenol. Concentraciones cercanas de 200 ppm de eugenol en la germinación reducen la concentración de eugenol (Figura 3). A valores de 0.95 de aw se requieren de 200 ppm de eugenol más bajas de eugenol. A valores de aw de 0.95 se requieren de 550 ppm de eugenol más altas de eugenol (Figura 3). La dependencia del pH es mayor a pH altos (Figura 3a) es necesario una mayor cantidad de eugenol para a pH bajos. En aw de 0.99 sin importar el pH se observa crecimiento.

### AGRADECIMIENTOS

Oscar Jiménez-González agradece a la UDLAP y al CONACYT por el financiamiento para sus estudios de posgrado.

Contacto:  
oscar.jimenez@udlap.mx

### CONCLUSIONES

Los modelos logístico y tiempo de falla son útiles para conocer las condiciones de crecimiento de *A. flavus* en las cuales eugenol a las cuales *A. flavus* puede crecer o no crecer. Además, es posible que conociendo el tiempo al cual *A. flavus* puede crecer, podamos extrapolarse a alimentos reales. Por otro lado, es necesaria la adición de eugenol para reducir el tiempo de germinación de *A. flavus*, o de ser necesario agregar por lo menos 600 ppm para extender la fase lag más de 1,400 h.

### AGRADECIMIENTOS

Oscar Jiménez-González agradece a la UDLAP y al CONACYT por el financiamiento para sus estudios de posgrado.

Contacto:  
oscar.jimenez@udlap.mx

### CONCLUSIONES

Debido a lo anterior el objetivo de este trabajo es presentar los modelos probabilísticos que describen la influencia de la aw, pH y la concentración de eugenol en el tiempo de germinación de *A. flavus*.

12. Jiménez-González, O., Recio-Cázares, E.L., **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-Munguía, M.T. 2021. “Efecto de la formulación en las propiedades físicas y de instantaneización de leche en polvo”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Modalidad virtual



La Academia Mexicana de Investigación y Docencia  
en Ingeniería Química (AMIDIQ)

otorga el presente

**RECONOCIMIENTO**

a:

Oscar Jiménez-González, Scarlett L. Recio-Cázares, Julio E. González-Pérez, María Teresa Jiménez-Munguía

**Por la presentación del trabajo en modalidad cartel:**

**EFECTO DE LA FORMULACIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y DE INSTANTANEIZACIÓN DE LECHE EN POLVO**



Dra. María del Rosario Enriquez Rosado  
PRESIDENTA DEL AMIDIQ DEL COMITÉ ORGANIZADOR



Dr. Tomás Viveros García  
PRESIDENTE DEL COMITÉ TÉCNICO

ID: 287

Evento virtual del 08 al 11 de septiembre de 2021

12. Jiménez-González, O., Recio-Cázares, E.L., **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-Munguía, M.T. 2021. “Efecto de la formulación en las propiedades físicas y de instantaneización de leche en polvo”, XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Poster, Modalidad virtual

## Efecto de la formulación en las propiedades físicas y de instantaneización de leche en polvo

**UDLAP**

Jiménez-González O., Recio-Cázares S.L., González-Pérez J.E., Jiménez-Munguía M.T. \*

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. \*marlatjimenez@udlap.mx

### INTRODUCCIÓN

La leche en polvo es usada para la elaboración de diferentes productos [1]. No obstante, su formulación, junto con el proceso de deshidratación y las condiciones de almacenamiento impactaran en las propiedades físicas (fluidez, humectabilidad, tamaño de partícula y microestructura), y de instantaneización (solubilidad, emulsificación, estabilidad térmica, gelificación, viscosidad y capacidad de retención de agua) [2]. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes propiedades físicas y de instantaneización, de seis sistemas de leche en polvo con diferente composición química.

### METODOLOGÍA

Leches en polvo comercial

Tabla 1. Composición básica de las diferentes leches.\*

Parámetro	Leche en polvo					
	ALC	ALD	STM	STDD	CA	CAD
Proteína (g)	25.8	27.7	19.0	15.5	12.0	14.2
Grasas totales (g/100 g)	25.8	16.7	11.5	9.0	12.0	19.5
Carbohidratos (g/100 g)	38.3	44.3	56.0	46.0	61.0	56.6
Fibra dietética (g/100 g)	0.0	0.0	0.0	15.5	7.0	0.0

\*Valores reportados en etiqueta.

### Propiedades evaluadas

- Densidad aparente ( $D_{Aparente}$ ) y compacta ( $D_{Compacta}$ )
- Índice de Carr (IC), Coeficiente de Hausner (Hc) y Ángulo de reposo ( $\theta$  Reposo)
- Color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , Hue, Cromo, IA: amarilleamiento e IB: blancura)
- Tamaño de partícula
- Humectabilidad
- Inmersabilidad

### Análisis de componentes principales

### RESULTADOS

Tabla 2. Valores de densidad aparente y compacta de las diferentes leches en polvo.

Muestra	Densidad aparente (g/mL)	Densidad compacta (g/mL)
ALC	0.422 ± 0.001a	0.567 ± 0.003a
ALD	0.406 ± 0.004ab	0.562 ± 0.005a
STM	0.415 ± 0.0250a	0.572 ± 0.011a
STDD	0.360 ± 0.005bc	0.505 ± 0.07b
CA	0.422 ± 0.007ab	0.547 ± 0.006a
CAD	0.395 ± 0.008c	0.474 ± 0.032ab

Tabla 3. Propiedades de fluidización.

Muestra	Índice de Carr	Cociente de Hausner	Ángulo de reposo
ALC	0.255 ± 0.005 ab	1.343 ± 0.014 ab	34.1 ± 2.0 e
ALD	0.278 ± 0.014 a	1.385 ± 0.027 a	31.1 ± 0.9 e
STM	0.276 ± 0.031 a	1.383 ± 0.059 a	40.3 ± 1.1 d
STDD	0.287 ± 0.020 a	1.403 ± 0.039 a	37.5 ± 0.5 c
CA	0.229 ± 0.022 ab	1.298 ± 0.036 ab	54.3 ± 1.1 a
CAD	0.164 ± 0.041 b	1.197 ± 0.059 b	44.3 ± 1.1 b

### REFERENCIAS

- Phosanam, et al. "Effect of storage conditions on physicochemical and microstructural properties of skim and whole milk powders". Powder Technology 372 (2020) 394–403.
- Sharma et al. "Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications—A review". Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 11 (2012) 518–528.

**RESUMEN:** Se evaluó el efecto de la composición de seis leches en polvo comerciales mediante análisis de componentes principales en propiedades físicas y de instantaneización. Ambas propiedades se relacionan con la composición de la leche. Se observaron tres grupos: i) alta cantidad de proteína y grasa; ii) baja cantidad de proteína y grasa pero alta cantidad de carbohidratos; iii) fibra añadida y baja cantidad de grasa; y dos componentes principales. Altos contenidos de carbohidratos afectan el color ( $p < 0.05$ ). Altos contenidos de grasa y proteína afectan a las propiedades de instantaneización haciendo más lenta la reconstitución, influenciado por el tamaño de partícula y la capacidad de aglomeración.

Tabla 4. Parámetros de color de las diferentes muestras de leche en polvo.

Muestra	$L^*$	$a^*$	$B^*$	Hue	Croma
ALC	89.5 ± 2.0 a	1.20 ± 0.87ab	8.93 ± 0.60 b	82.15 ± 5.84 ab	9.04 ± 0.51 b
ALD	88.9 ± 2.7 a	2.20 ± 0.35 a	11.03 ± 1.00 ab	78.75 ± 1.01 b	11.25 ± 1.04 a
STM	88.3 ± 1.0 a	0.07 ± 0.45 b	9.23 ± 0.97 b	89.39 ± 2.81 a	9.24 ± 0.96 ab
STDD	82.4 ± 1.7 a	0.53 ± 0.06 ab	12.33 ± 0.21 a	87.52 ± 0.23 ab	12.34 ± 0.21 a
CA	89.1 ± 1.9 a	-0.07 ± 0.49 b	9.63 ± 0.91 b	90.45 ± 2.87 a	9.64 ± 0.91 ab
CAD	87.6 ± 1.1 a	0.20 ± 0.79 b	9.60 ± 0.87 b	89.10 ± 4.87 a	9.62 ± 0.87 ab

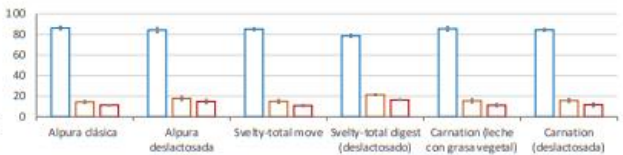


Figura 1. Índices de color calculados para las diferentes muestras, índice de blancura, índice de amarilleamiento e índice de oscurecimiento.

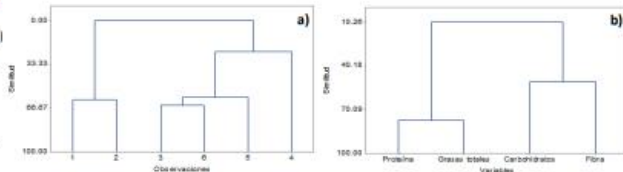


Figura 2. Dendrograma de a) observaciones o tipos de muestra (1=ALC, 2=ALD, 3=STM, 4=STDD, 5=CA, 6=CAD) y b) variables o composición.

Tabla 5. Propiedades de instantaneización.

Muestra	Humectabilidad (seg)		Inmersabilidad (seg)		Dispersibilidad (seg)	
	21 °C	36 °C	21 °C	36 °C	21 °C	36 °C
ALC	11.0 ± 1 b	8.3 ± 0.1 a	28.3 ± 1.6 a	21.1 ± 1.6 a	62.5 ± 1.8 a	26.5 ± 1.9 a
ALD	13.6 ± 1.1 a	4.1 ± 0.1 b	83.3 ± 25.1 a	17.4 ± 7.4 b	47.7 ± 1.3 b	20.0 ± 1.9 b
STM	3.6 ± 0.5 c	3.3 ± 0.2 b	5.0 ± 0.1 b	3.4 ± 0.2 c	9.9 ± 0.2 b	5.5 ± 2.1 c
STDD	1.0 ± 0.1 d	0.8 ± 0.1 c	1.2 ± 0.2 b	0.8 ± 0.1 c	6.3 ± 0.5 b	4.2 ± 0.3 c
CA	2.0 ± 0.1 cd	1.2 ± 0.1 c	2.1 ± 0.1 b	1.3 ± 0.1 c	8.8 ± 0.2 b	6.2 ± 0.3 cd
CAD	0.8 ± 0.1 d	0.5 ± 0.5 c	0.9 ± 0.0 b	0.6 ± 0.1 c	3.9 ± 0.1 b	3.1 ± 0.1 d

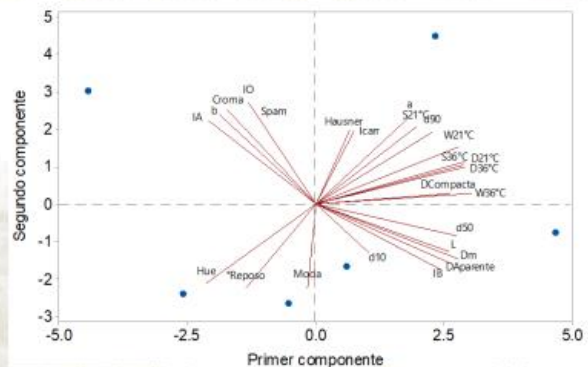


Figura 3. Análisis de componentes principales de diferentes marcas de leche en polvo.

### CONCLUSIONES

Diferentes propiedades físicas y de instantaneización de la leche en polvo fueron evaluadas mediante un análisis de componentes principales. Los altos contenidos de grasa y proteína pueden afectar a las propiedades de instantaneización ya que hace a la reconstitución más lenta, afecta al tamaño de partícula.

13. Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., López-Malo, A. 2020. “Spend coffee ground agglomerations as size enlargement with future applications”, e-Latin Food 2020, 9<sup>th</sup> Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.

 **POSTER PRESENTATION AWARD** 

**e-Latin 2020 Food 2020**  
9<sup>th</sup> Food Science, Biotechnology & Safety Congress  
11-13 NOVEMBER

**MEXICAN ASSOCIATION OF FOOD SCIENCE AWARDS THE PRESENT CERTIFICATE TO:**

**Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., López-Malo, A.**

**for the SECOND PLACE IN POSTER PRESENTATION of the outstanding work entitled**  
**“Spend coffee ground agglomerations as size enlargement with future applications”**  
**in FOOD PROCESSING AND ENGINEERING area**  
**of the e-Latin Food 2020. 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress.**


  
Dr. Nicolas Oscar Soto Cruz  
President of AMECA

  
Dr. Rosa Maria Rodriguez Jasso  
President of the Organizing Committee


  
Dr. Ana Verónica Charles Rodriguez  
President of the Scientific Committee




13. Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., López-Malo, A. 2020. “Spend coffee ground agglomerations as size enlargement with future applications”, e-Latin Food 2020, 9<sup>th</sup> Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.



**CONACYT**  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



**UDLAP**



**e-Latin Food 2020**

**Spend coffee ground agglomerations as size enlargement with future applications**

**Jiménez-González, O.<sup>1</sup>, González-Pérez, J.E.<sup>1</sup> & López-Malo, A.<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México. \*Email: Aurelio.lopezm@udlap.mx

**Introduction**

The coffee industry generates a lot of waste. The spend coffee grounds (SCG) disposition into the nature affect the ecosystem due to the high amount of caffeine and polyphenols impeding its use as compost [1-3]. SCG could be used as source for enzyme [4] production through solid-state fermentation, but small particle size of SCG could reduce the microorganism development [5].

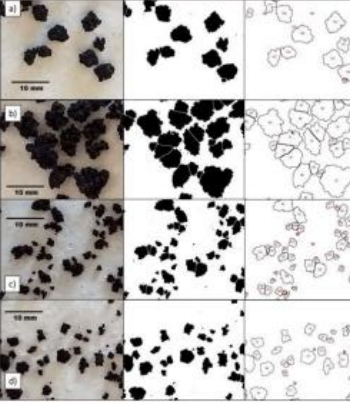
**Objective**

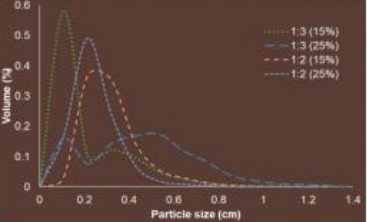
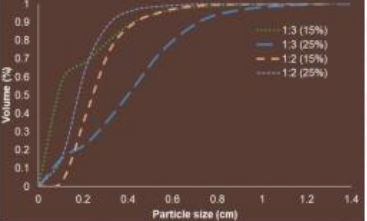
The aim of this work was to use the fluidized bed as agglomeration method to increase particle size for future applications in the enzyme production.

**Materials and methods**

Local SCG was dried (40°C/40h), particle size 125-250 µm. Agglomeration process was made with 50g SCG and adding arabic gum (AG) (15 or 25% w/v) and sodium alginate (0.5%) at 2:1, 3:1, ratio. SCG was kept 30min/50°C in a fluidized bed.

Particle size was measured with ImageJ software, data was used to calculate  $D_{3,2}$  (average-particle-area) and  $D_{4,3}$  (average-particle-volume), bulk and tapped density were used as an estimation of porosity.



**Results and discussion**

Table 1 show particle size parameters. Particle size ranged between 0.12-13.07mm. Values were higher with 25% AG/1:3 ratio, this conditions also exhibit higher values of  $D_{3,2}$  and  $D_{4,3}$ . On the contrary, 15% AG/1:3 ratio present the lowest values of the four formulations. Both formulations shows present a bimodal behaviour (Fig 1) due to the agglomerated particles. The rest of the formulations present a unimodal behaviour but high distribution sizes. Bulk density did not show significant differences ( $p>0.05$ ). On the other hand, tapped density was lower with in all samples except 25% 1:2. Relation between density and porosity results of the air in the agglomerate, this could encourage

the microbial growth due to the water holding capacity or the water in the monolayer.

**Table 2. physical characteristic of coffee agglomerate**

Sample	Density	
	Bulk (g/cm <sup>3</sup> )	Compact (g/cm <sup>3</sup> )
1:3 (15%)	0.343±0.035 <sup>a</sup>	0.356±0.037 <sup>b</sup>
1:3 (25%)	0.369±0.011 <sup>a</sup>	0.377±0.003 <sup>ab</sup>
1:2 (15%)	0.313±0.019 <sup>a</sup>	0.358±0.013 <sup>b</sup>
1:2 (25%)	0.344±0.035 <sup>a</sup>	0.460±0.014 <sup>a</sup>

Mean ± standard deviation (n=3); different letters in the same column indicate significant differences between samples (P<0.05)

**Table 1. Size parameters of agglomerate coffee**

Sample	Min size	Max size	d10	d50	d90	Span	D[3,2]	D[4,3]
1:3 (15%)	0.012	1.119	0.018	0.092	0.426	4.432	0.520	0.632
1:3 (25%)	0.011	1.307	0.067	0.399	0.723	1.643	0.655	0.744
1:2 (15%)	0.047	1.179	0.127	0.245	0.438	1.268	0.414	0.511
1:2 (25%)	0.044	0.766	0.064	0.179	0.325	1.457	0.315	0.388

Each value was obtained with 1200 partide analysis

**References**


- Murthy, P.S., & Naidu, M.M. (2012a). Sustainable management of coffee industry by products and value addition- a review. *Resour Conserv Recy.* 66, 45-58.
- Alves, R. C., Rodríguez, F., Nunes, M. A., Vinha, A. F., & Oliveira, M. B. P. P. (2017). State of the art in coffee processing by-products. In C. M. Galanakis (Ed.). *Handbook of coffee processing by-products* (pp. 1–26). Cambridge: Academic Press.
- Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S. (2018). Bio-refinery approach for spent coffee grounds valorization. *Bioresource Technology.* 247, 1077-1084.
- Murthy, P.S., Naidu, M.M., Srinivas, P. (2009). Production of α-amylase under solid-state fermentation utilizing coffee waste. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology.* 84, 1246-1249
- Soccol, C.R., Luciani, P.S., & Vandenberghe. (2003). Overview of applied solid-state fermentation in Brazil. *Biochemistry Engineering.* 13, 205-218.

210

14. Jiménez-González, O., **González-Pérez, J.E.**, Guerrero-Beltrán, J.A. 2020. “Sensory evaluation of Mexican salsas prepares with Jalapeño, Poblano or Serrano var. Tampiqueño chili peppers”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.



14. Jiménez-González, O., González-Pérez, J.E., Guerrero-Beltrán, J.A. 2020. “Sensory evaluation of Mexican salsas prepared with Jalapeño, Poblano or Serrano var. Tampiqueño chili peppers”, e-Latin Food 2020, 9th Food Science, Biotechnology and Safety Congress. Poster, Modalidad virtual.



**Sensory evaluation of Mexican salsas prepared with Jalapeño, Poblano or Serrano var. Tampiqueño chili peppers**

Jiménez-González, O.<sup>1</sup>, González-Pérez, J.E.<sup>1</sup> & Guerrero-Beltrán, J.A.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México. \*Email: angel.guerrero@udlap.mx

### INTRODUCTION

Mexican *salsas* are a very common side dish or a dressing, which could help to change or improve the flavor of foods. Due to their complexity, derived from the ingredients, Mexican *salsas* have a great acceptability [1-2]. The main ingredients are *chilli* pepper (fresh or dried), garlic, tomato or “tomatillo”, salt, and oil (sometimes) [3]. The chili pepper type is an important ingredient to the final flavor, spiciness, color, among other characteristics of the salsas.

### OBJECTIVE

The aim of this work was to compare the effect of *chilli* pepper types in the sensory characteristics of three green oil-based *salsas*.

### MATERIALS AND METHODS

Sauces elaboration: all ingredients were sauté in a pan (10min light-green-color surface of chili pepper), cooled down and blended with salt.


Sensory evaluation was performed one day after salsas were prepared.

Salsas were topped on “tortilla-chips”.

Consumers evaluated appearance, color, aroma, visual texture, flavor, mouthfeel texture acceptability, and general acceptability using a 9-points hedonic scale. Judges also evaluate spiciness (“picante” capsaicin sensation) and the intensity of green color. Color parameters (L\*, a\*, b\*) of salsas were measured using a colorimeter.

### RESULTS AND DISCUSSION

The Poblano salsa had the lowest L\* (41.33±2.4, lightness) and b\* (-3.99±0.21, greenness) color values (Fig 1 and Table 2). The serrano and jalapeño salsas presented differences only in a\* values (p<0.05) being higher in the jalapeño salsa.



Jalapeño      Tampiqueño      Poblano

Fig. 1 Final sauces

Sample	L*	a*	b*	Hue	Chroma
Poblano	41.33±2.4 <sup>b</sup>	-3.99±0.21 <sup>c</sup>	32.79±2.19 <sup>a</sup>	96.95±0.33 <sup>c</sup>	33.03±2.19 <sup>b</sup>
Tampiqueño	48.86±1.53 <sup>a</sup>	-4.85±0.26 <sup>b</sup>	24.36±1.29 <sup>b</sup>	101.25±0.02 <sup>b</sup>	24.84±1.32 <sup>b</sup>
Jalapeño	47.63±0.98 <sup>a</sup>	-8.09±0.11 <sup>a</sup>	25.64±0.48 <sup>b</sup>	107.51±0.13 <sup>a</sup>	26.88±0.49 <sup>b</sup>


Mean±SD, n=3, Means with different letter in the same column indicate significant difference between sample by Tukey's test (p<0.05)

Regarding the sensory test, the Poblano salsa had the lower values in all parameters (Fig 2). The Poblano salsa had the lowest spiciness, compared with the other two salsas (Table 2). The Poblano salsa presented the higher values in green color (Table 2).

Sample	Chile-like Flavour	Color intensity
Poblano	4.66±2.89 <sup>b</sup>	7.21±2.21 <sup>a</sup>
Tampiqueño	7.42±2.19 <sup>a</sup>	3.42±1.88 <sup>c</sup>
Jalapeño	7.41±1.71 <sup>b</sup>	4.88±2.14 <sup>b</sup>

Mean±SD, n=3, Means with different letter in the same column indicate significant difference between sample by Tukey's test (p<0.05)

Finally, the main factors that affected general acceptability were appearance, color, aroma, and flavor.



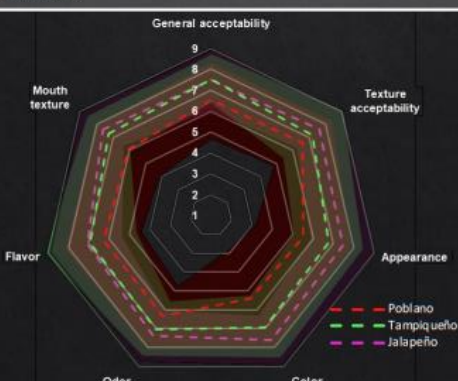


Fig. 2 Sensory profile of sauces with three different chilli peppers

### CONCLUSIONS

All formulations were very well accepted by judges, especially, the jalapeño and serrano salsas. The chili pepper type affected flavor and color of salsas, leading to the judges to prefer one salsa to another.

### ACKNOWLEDGMENTS

Authors Jiménez-González and González-Pérez gratefully acknowledges their financial support for their PhD studies from Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) and National Council for Science and Technology (CONACYT) of Mexico.

### REFERENCES

- Guzmán, I., & Bosland, P.W. (2017). Sensory properties of chili pepper heat- and its importance to food quality and cultural preference. *Appetite*, 117, 186-190.
- Kim, H.J., Chung, S.-J., Kim, K.-O., Nielsen, B., Ishii, R., & O'Mahony, M. (2018). A cross-cultural study of acceptability and food pairing for hot sauces. *Appetite*, 123, 306-316.
- McKee, L. H., Christopher, J., & Bock, M. A. (2003). Quality evaluation of commercial chile-based salsas. *Plant Foods for Human Nutrition*, 58(3), 1-12.

## Publicaciones en memorias

Las evidencias de las publicaciones en memorias de congresos fueron los siguientes:

1. **González-Pérez, J.E.**, Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modelación dinámica de un proceso de deshidratación osmótica de manzana mediante un Observador de Luenberger”, Memorias del XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ. (ALI 45-ALI48). Ciudad de México, México: Robledo Ortíz, J.R. Recuperado de <https://amidiq.com/avances-en-ingenieria-quimica/>
2. **González-Pérez, J.E.**, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. “Determinación de los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos en la osmodeshidratación de manzana con jugo de uva”, Memorias del XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ. (ALI 25-ALI29). Ciudad de México, México: Robledo Ortíz, J.R. Recuperado de <https://amidiq.com/avances-en-ingenieria-quimica/>
3. **González-Pérez, J.E.**, Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. “Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate”, Latin Food 2022. (361). Ciudad de México: AMECA.
4. **González-Pérez, J.**, Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. 2021. “Optimization of the vacuum impregnation of beta-carotene in jicama with carrot juice”, Latin Food 2022. (316). Ciudad de México: AMECA.

1. **González-Pérez, J.E.**, Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2021. “Modelación dinámica de un proceso de deshidratación osmótica de manzana mediante un Observador de Luenberger”, Memorias del XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ. (ALI 45-ALI48). Ciudad de México, México: Robledo Ortiz, J.R. Recuperado de <https://amidiq.com/avances-en-ingenieria-quimica/>

Memorias del XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ  
08 al 11 de Septiembre de 2021

**MODELACIÓN DINÁMICA DE UN PROCESO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE MANZANA MEDIANTE UN OBSERVADOR DE LUENBERGER**

*Julio Emmanuel González-Pérez<sup>a</sup>, Aarón Romo-Hernández<sup>a</sup>, Nelly Ramírez-Corona<sup>a</sup>, Aurelio López-Malo<sup>a\*</sup>*  
<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México. aurelio.lopezm@udlap.mx

**Resumen**

En este trabajo se propone una metodología para describir las cinéticas de transferencia de solutos durante el proceso de osmodeshidratación (OD) de cubos de manzana en soluciones de sacarosa (40, 50 y 60°Brix) mediante un observador de Luenberger con un modelo dinámico de primer orden. El observador se usó para estimar los valores de la constante específica de transporte de masa ( $\hat{k}$ ) relacionada con la transferencia de solutos durante el tiempo de tratamiento. Los resultados muestran como el observador permite describir adecuadamente el comportamiento dinámico de la transferencia de solutos durante el proceso de OD. A manera de ejemplo ilustrativo, mostramos cómo el sistema propuesto es capaz de predecir datos experimentales con una precisión adecuada ( $R^2 > 0.97$ ) una vez se ha sintonizado la dinámica del observador de manera adecuada.

**Introducción**

La OD de alimentos es un proceso de transferencia de masa donde el producto se pone en contacto con una solución hipertónica de un soluto. Durante este proceso el producto sufre de una deshidratación parcial incrementando así su contenido de sólidos [1]. La estimación de cinéticas de transferencia de masa es importante para optimizar el proceso de OD y para la obtención de productos con características específicas de composición de solutos, de textura, de aspectos sensoriales o estabilidad microbiológica [2]. Algunos estudios proponen el uso de modelos dinámicos de primer orden basados en la información de entradas y salidas para estimar constantes cinéticas de procesos biotecnológicos como secado de alimentos y extracción sólido-líquido [3, 4]. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología para modelar la transferencia de solutos durante la OD de manzana con soluciones de sacarosa usando un observador de Luenberger con un modelo dinámico de primer orden.

**Metodología**

Cubos de manzana de la variedad *Granny Smith* (1.2 × 1.2 × 1.2 cm) fueron sumergidos individualmente en soluciones de sacarosa (40, 50 y 60°Brix, 40°C, utilizando una relación de 10 g solución/ g producto) por diferentes tiempos (0 - 3500 s). Pasado el tiempo de inmersión, a los cubos se les determinó la concentración de sólidos solubles totales ( $C_s$ , °Brix) con ayuda de un refractómetro digital; los experimentos se realizaron por triplicado. Posteriormente, los datos experimentales fueron promediados y se utilizaron para modelar la dinámica de la transferencia de solutos con un modelo dinámico de primer orden (Ec. 1):

$$\frac{dC_s}{dt} = k(C_s^\infty - C_s) \tag{1}$$

empleando un observador de Luenberger (Ec. 2 y 3):

$$\frac{d\hat{C}_s}{dt} = \hat{k}(C_s^\infty - C_s) - \omega(C_s - \hat{C}_s) \tag{2}$$

$$\frac{d\hat{k}}{dt} = \gamma C_s(C_s - \hat{C}_s) \tag{3}$$

2. **González-Pérez, J.E., Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022.** “Determinación de los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos en la osmodeshidratación de manzana con jugo de uva”, Memorias del XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ. (ALI 25-ALI29). Ciudad de México, México: Robledo Ortiz, J.R. Recuperado de <https://amidiq.com/avances-en-ingenieria-quimica/>

Memorias del XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ  
23 al 26 de agosto de 2022

### **DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD DE COMPUESTOS BIOACTIVOS EN LA OSMODESHIDRATACIÓN DE MANZANA CON JUGO DE UVA**

*Julio Emmanuel González-Pérez, Oscar Jiménez-González, Nelly Ramírez-Corona, Aurelio López-Malo\**  
Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México. \*aurelio.lopezm@udlap.mx

#### **Resumen**

Se determinaron los coeficientes de difusividad (D) de transferencia de masa de los compuestos bioactivos incorporados en manzana mediante osmodeshidratación (OD) con soluciones osmóticas (SOD) de jugo de uva. El proceso de OD se realizó con diferentes concentraciones de jugo (40, 50 y 60°Brix), y temperatura constante (40°C) utilizando una relación de 1 g de cubo de manzana/10 g de solución. Durante el proceso de OD se midió la actividad de agua (aw) de la muestra y de la SOD para determinar el estado de equilibrio osmótico. Además, los cubos se analizaron en términos de su pérdida de agua (PA) y ganancia de sólidos (GS). Asimismo, se determinó la actividad antioxidante (AA), el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) y antocianinas monoméricas totales (AMT). Finalmente, para la estimación de los D se empleó la solución analítica de un modelo difusivo para la descripción de los datos de PA, GS, AA, CFT y AMT. Los D para de los compuestos bioactivos analizados fueron  $D_{AA}=1.31-3.82 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{CFT}=2.79-3.46 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $D_{AMT}=4.29-6.25 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  con coeficientes de correlación superiores a 80%.

#### **Introducción**

El consumo de alimentos saludables ha incrementado en los últimos años [1]. Se buscan alimentos con sabor y aspecto agradable y que proporcionen beneficios nutricionales, por lo que ha incrementado el desarrollo de productos ricos en compuestos bioactivos a base de frutas [2]. Uno de los métodos para la elaboración de alimentos funcionales a base de frutas es utilizar la osmodeshidratación. Este proceso de transferencia de masa ocurre cuando una matriz sólida sumergida en una solución hipertónica gana solutos y pierde agua mediante difusión [3]. Dicha transferencia de masa ha sido modelada con la segunda ley de Fick. La mayoría de los estudios que utilizan la segunda ley de Fick describen únicamente la difusión de solutos y agua [2], sin embargo, son muy pocos los que contemplan la transferencia de masa de los compuestos bioactivos [4], a pesar de la importancia que estos representan para el producto final. Por lo que, el objetivo de este trabajo fue determinar los coeficientes de difusividad de compuestos bioactivos en la osmodeshidratación de manzana sumergida en diferentes concentraciones de jugo de uva.

#### **Metodología**

La osmodeshidratación consistió en sumergir cubos de manzana *var.* Granny Smith (1.2 cm por lado) en soluciones de jugo concentrado de uva *var.* Victoria (40, 50 y 60°Brix) y una relación de 10 g solución/g muestra. El equilibrio se consideró cuando las muestras osmodeshidratadas alcanzaron la actividad de agua de la solución osmótica ( $aw_{40^\circ\text{Brix}}=0.933 \pm 0.010$ ,  $aw_{50^\circ\text{Brix}}=0.904 \pm 0.020$ ,  $aw_{60^\circ\text{Brix}}=0.847 \pm 0.010$ ). Durante el proceso se seleccionaron tiempos de inmersión y se determinó la pérdida de agua (PA=g agua/g producto) y ganancia de solutos (GS= g solutos/g producto). Posteriormente, los compuestos bioactivos de las muestras osmodeshidratadas se extrajeron con una solución etanólica (0.1% de HCl), se centrifugaron a 12000×g por 10 min.

El sobrenadante se utilizó para determinar mediante métodos espectrofotométricos la cantidad de compuestos bioactivos. La actividad antioxidante (AA) mediante la inhibición del radical libre DPPH;

3. **González-Pérez, J.E.**, Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. “Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate”, Latin Food 2022. (361). Ciudad de México: AMECA.




**Modeling of mass transfer parameters during osmosonication of apple in grape concentrate**

González-Pérez, J.E.<sup>1</sup>, Ramírez-Corona, N.<sup>1</sup>, López-Malo, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Depto. de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, UDLAP. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, Mexico.

\*Presenting author: julio.gonzalezpz@udlap.mx

**Abstract**

Fruits osmodehydration (OD) in fruit juices has been used to generate high nutritional value products. Bioactive compounds in fruit juices can help to reduce the risk of some diseases; particularly grape juice (GJ) has anti-inflammatory, antioxidant, and chelating metal properties and has been related to reduction of cardiovascular diseases. [1]. In contrast, mass transfer (MT) during OD process is limited by the high solute content on the external part of the product [2]. The ultrasound can homogenize solute impregnation in fruit tissue (T) [3]. Therefore, this study was aimed to model the (MT) kinetics during osmosonication (OS) of apples in GJ. Apple (cv. Granny Smith) cubes were immersed in GJ (40, 50, and 60°Brix at 40°C) and subjected to ultrasound treatment with a frequency of 25 kHz/30 min. They were kept submerged until an osmotic equilibrium-state was reached. Image processing was used to analyze fruit T-staining. It was related to juice impregnation. The results showed that equilibrium conditions were reached at  $t > 64,800$  s. At these time, water loss increased ( $p < 0.05$ ) with OS procedure and high osmotic solution concentration. In addition, osmodehydrated samples had a greater solutes gain. However, these solutes are concentrated on the product surface. Osmosonicated samples presented a complete T-staining in contrast to osmodehydrated (70-80%). Fick's second law model showed that water diffusion in OS varied from  $1.78-3.66 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, and  $2.00-3.27 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for OD-experiments. While solutes diffusion values were between  $3.57-6.41 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s and  $1.64-2.64 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for OS and OD experiments, respectively. In conclusion, OS is adequate to increase water diffusion and homogenizing solutes impregnation in product T.

*Keywords: Diffusion, image processing, osmosonication, tissue staining, mass transfer.*

[1] Lamas *et al.*, 2015. International Journal of Experimental Pathology, 96, 301-310. [2] González-Pérez *et al.*, 2021. Food Engineering Reviews, 13, 344-374. [3] Osae *et al.*, 2019. Journal of Food Biochemistry, 43, 1-14.

**10th Food Science, Biotechnology & Safety Congress**  
Asociación Mexicana de Ciencia de los Alimentos A.C.  
MEXICAN ASSOCIATION OF FOOD SCIENCE

**PUEBLA**  
MÉXICO | 16-18 NOVIEMBRE 2022

4. **González-Pérez, J.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. 2022. 2021. “Optimization of the vacuum impregnation of beta-carotene in jicama with carrot juice”, Latin Food 2022. (316). Ciudad de México: AMECA.




**Optimization of the vacuum impregnation of beta-carotene in jicama with carrot juice**

González-Pérez, J.E.<sup>1\*</sup>, Jiménez-González, O.<sup>1</sup>, Ramírez-Corona, N.<sup>1</sup>, López-Malo, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, Mexico.

\*Presenting author: julio.gonzalezpz@udlap.mx

**Abstract**

Carotenoid consumption has been shown to prevent and decrease certain types of cancer and cardiovascular and degenerative diseases [1]. Recently, alternatives for consuming foods rich in carotenoids have been sought [2]. In this work, response surface methodology (RSM) was used to maximize  $\beta$ -carotene from carrot (*Daucus carota*) juice concentrate into jicama (*Pachyrhizus erosus*) cylinders (1 mm diameter by 2 mm long) through vacuum impregnation. For the impregnation process, a temperature of 40°C, an absolute pressure of 51 mmHg, and a 10 g carrot juice/g fresh product ratio were considered. The selected factors were the immersion time (t=20, 30, and 40 min) and the concentration of the osmotic agent (C=20, 35, and 50°Brix). After each treatment, solid gain (SG), water loss (WL), total carotenoids (TC), as well as total soluble solids (TSS) and water activity ( $a_w$ ) of jicama were determined. The polynomial equations (PE) obtained to describe SG, WL, TC, TSS, and  $a_w$  of the product had  $R^2 > 0.85$ . Increasing the C increased the values ( $p < 0.05$ ) of SG, TC, and TSS and decreased ( $p < 0.05$ ) the values of WL and  $a_w$ . The PE of the analyzed responses include a quadratic effect ( $p < 0.05$ ) of the process time, probably due to the saturation of solutes on the product surface. The optimum conditions were t=31 min and 50°Brix. At these conditions, the impregnated jicama reached a value of 2.6  $\mu\text{g}$   $\beta$ -carotene / 100g dry basis, 19.3°Brix, and  $a_w=0.946$ . Therefore, it was possible to incorporate carotenoids in jicama by optimizing the vacuum impregnation conditions; however, a drying treatment is necessary to increase the shelf life of the product obtained.

*Keywords: Optimization, Pachyrhizus erosus, Daucus carota, Vacuum, impregnation.*

[1] Stinco, *et al.*, 2019. Journal of Food Composition and Analysis Bioaccessibility, 78, 24–32. [2] Meléndez-Martínez *et al.*, 2021. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62, 1999-2049.

**10th Food Science, Biotechnology & Safety Congress**  
Asociación Mexicana de Ciencia de los Alimentos A.C.  
MEXICAN ASSOCIATION OF FOOD SCIENCE

**PUEBLA**  
MÉXICO | 16-18 NOVIEMBRE 2022



## Publicaciones en revistas

Las evidencias de las publicaciones en revistas fueron los siguientes:

1. **González-Pérez, J. E.,** Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2021). Mass transfer during osmotic dehydration of fruits and vegetables: Process factors and non-thermal methods. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 344–374. **doi: 10.1007/s12393-020-09276-3**
2. **González-Pérez, J. E.,** Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2022). Modeling mass transfer during osmodehydration of apple cubes with sucrose or apple juice concentrate solutions: Equilibrium estimation, diffusion model, and state observer-based approach. *Journal of Food Process Engineering*. **doi: 10.1111/jfpe.14125**
3. **González-Pérez, J. E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., Guerrero-Beltrán, J. A., & López-Malo, A. (2022). Vacuum impregnation on apples with grape juice concentrate: Effects of pressure, processing time, and juice concentration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102981. **doi: 10.1016/j.ifset.2022.102981**
4. **González-Pérez, J. E.,** & López-Malo, A. (2022). Sensory evaluation of apple cubes (*Granny Smith* var.) impregnated with concentrated grape juice (*Victoria* var.) subjected to convection drying. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 9(54), 28–39. [https://riiit.com.mx/apps/site/files\\_v2450/cubos\\_manzana\\_pue.\\_3\\_riiit\\_ene-feb\\_2022.pdf](https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/cubos_manzana_pue._3_riiit_ene-feb_2022.pdf)
5. **González-Pérez, J. E.,** Ramírez-Corona, N. López-Malo, A. (2022). Fruta fortificada con probióticos: una forma de cuidar tu salud. *Contexto*. Mayo 2022. <https://contexto.udlap.mx/fruta-fortificada-con-probioticos/>
6. **González-Pérez, J. E.,** Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. (2023). Modeling of Drying Kinetics of Fresh and Osmodehydrated Apples during Convective Drying. In L. R. Hernández, & M. A. S. Meneses (Eds.), *Technology, Science and Culture: A Global Vision, Volume IV*. Rijeka: IntechOpen. **doi: 10.5772/intechopen.105162**

7. **González-Pérez, J. E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2023). Use of a Response Surface Methodology to optimise vacuum impregnation of  $\beta$ -carotene from *Daucus carota* in *Pachyrhizus erosus*. *Sustainable Food Technology*. doi: **10.1039/D2FB00036A**
8. **González-Pérez, J. E.,** López-Malo, A. (Aceptado). Modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas: factores de proceso y métodos no térmicos. *Revista Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*



# Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables: Process Factors and Non-Thermal Methods

Julio E. González-Pérez<sup>1</sup> · Nelly Ramírez-Corona<sup>1</sup> · Aurelio López-Malo<sup>1</sup>

Received: 31 July 2020 / Accepted: 11 December 2020

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Science+Business Media, LLC part of Springer Nature 2021

## Abstract

Osmotic dehydration of fruits and vegetables is a slow process due to resistance in mass transfer (MT). This resistance can be modified by varying the osmotic solution or process conditions, or by employing non-thermal treatments (NTT). Some NTT modify the tissue structure by formation of pores in the cell membrane (such as pulse electric fields) or microchannels (such as ultrasound and osmosonication), and others increase the contact surface area with the tissue through a decrease in atmospheric pressure (such as vacuum pulses) or an increase of the system pressure (such as high hydrostatic pressures). Changes in the rate of MT caused by modifications in experimental conditions can be described with mathematical models, such as Fick's second law. The aims of this review are to analyze the different factors that modify MT rate during osmotic dehydration, examine the application of NTT to modify MT, and to study models that describe these processes.

**Keywords** Osmotic dehydration · Cell structure · Non-thermal treatments · Mass transfer

## Introduction

Fruits and vegetables are a crucial source of nutraceutical compounds in the human diet. These compounds comprise vitamins, minerals, fiber, natural colors, and antioxidants, all of which may be beneficial to the human body [86, 99]. However, the high moisture content of fruits and vegetables makes them susceptible to biochemical and microbiological changes that shorten their shelf life [23].

Dehydration has been used to obtain foods with low moisture (with water activity levels lower than 0.70) or intermediate moisture (with water activity levels between 0.70 and 0.85) levels that can be stored for long periods [96, 107]. An increase in temperature during the dehydration process results in a reduced process time, although high temperatures lead to loss of thermo-sensitive nutrients, modification of sensory characteristics (caused by chemical or enzymatic reactions), morphometric changes, and other undesirable changes in quality parameters [102].

Osmotic dehydration is a method that allows the production of intermediate moisture foods. In addition, it helps to inhibit enzymatic browning and can improve the appearance and taste of fruits and vegetables. The process involves the simultaneous incorporation of solutes (present in a hypertonic solution) and removal of water [86, 99].

During osmotic dehydration, MT is slow, and there may be loss of vitamins, minerals, or some organic acids through leaching of solids [58, 125]. MT mechanisms are affected by various rate-controlling parameters, such as the osmotic agent used (composition and concentration), the food matrix (physicochemical characteristics), or process conditions (time, agitation or temperature), many of these have been studied [24, 44, 51, 73, 80, 81].

In the food industry, the main parameter altered to reduce operating time during osmotic dewatering is temperature. An increase in temperature during osmotic dehydration of fruits and vegetables increases the permeability of their cell membrane and accelerates MT [2, 11]. However, high temperatures can negatively affect product quality (color, texture, flavor, etc.) [13, 102]. Non-thermal methods have been developed to enhance MT without adversely affecting quality. These techniques include the use of high hydrostatic pressure, vacuum pulses, electrical pulses, ultrasound, and osmosonication [29, 32, 67, 79, 88].

✉ Aurelio López-Malo  
aurelio.lopezm@udlap.mx

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Sta. Catarina Mártir, Cholula, Puebla 72810, Mexico

Received: 20 December 2021 | Revised: 27 May 2022 | Accepted: 4 June 2022

DOI: 10.1111/jfpe.14125

ORIGINAL ARTICLE

Journal of  
Food Process Engineering

WILEY

# Modeling mass transfer during osmodehydration of apple cubes with sucrose or apple juice concentrate solutions: Equilibrium estimation, diffusion model, and state observer-based approach

Julio Emmanuel González-Pérez  | Aarón Romo-Hernández  |  
Nelly Ramírez-Corona  | Aurelio López-Malo 

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, Mexico

## Correspondence

Aurelio López-Malo, Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, Mexico.  
Email: aurelio.lopezm@udlap.mx

## Funding information

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

## Abstract

This article investigates the modeling aspects of mass transfer during osmodehydration of apple cubes. The obtained experimental data were fitted to three mathematical models: Azuara's equilibrium mass-transfer model (AM), Fick's second law (FSL), and a Luenberger observer (LO). Two scenarios were considered for the mathematical modeling of mass transfer between the osmotic solution and the apple cubes. First, constant apple volume during the osmodehydration process was assumed. Then we included volume shrinkage in the dehydrated product as part of the model. The effect of the osmotic agent in the apple dehydration was also addressed by considering two different osmotic solutions, apple juice concentrate, and sucrose solutions, with different concentrations (40, 50, and 60 °Brix). The equilibrium parameters estimated with the AM model were similar to the parameters determined experimentally ( $p > .05$ ). The LO model accurately describes the solute mass transfer dynamics during the osmodehydration process ( $R^2 > .950$ ). The overall findings indicate that considering the volume shrinkage as part of the model strongly influences the parameter estimation. When considering volume shrinkage in the FSL model, the estimated diffusivity parameters ranged from  $1.26$  to  $5.05 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for water and  $0.68$ – $19.35 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for solutes, respectively. Not considering product shrinkage in the diffusivity model leads to overestimating both water diffusivity (29.9–76.8%) and solute diffusivity (25.3–52.8%).

## Practical Applications

Osmotic dehydration (OD) refers to a mass transfer process where solutes are transported from a hypertonic solution to a food material, while water moves from the food material towards the solution. OD improves the appearance and taste of dehydrated foods, helps inhibit the growth of dangerous microorganisms, and decreases enzymatic browning in some foods. Sucrose solutions are frequently used as osmotic solutions for food treatment in OD. An alternative to sucrose is to treat food with fruit juice concentrates. Fruit juice concentrates have low water activity and can provide bioactive compounds that enrich the dehydrated product. Understanding the effect of different



Contents lists available at ScienceDirect

Innovative Food Science and Emerging Technologies

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ifset](http://www.elsevier.com/locate/ifset)

## Vacuum impregnation on apples with grape juice concentrate: Effects of pressure, processing time, and juice concentration

Julio E. González-Pérez, Oscar Jiménez-González, Nelly Ramírez-Corona, José A. Guerrero-Beltrán, Aurelio López-Malo\*

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, Mexico

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Antioxidants  
Bioactive compounds  
Box-Behnken design  
Image processing  
Tissue staining

### ABSTRACT

Apple cubes were subjected to vacuum impregnation using grape juice concentrate. The effect of pressure reduction (VP = 100–500 mmHg), immersion time ( $t = 10$ –30 min), and concentration of grape juice (C = 40–60°Brix) on impregnation parameters were evaluated using response surface methodology. Second-order polynomial equations were developed ( $R^2 > 0.895$ ) to describe the behavior of water loss, total soluble solids,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $Hue$ , total color difference, the color of impregnated/treated areas ( $A_U/A_{OP}$ ), antioxidant activity, total monomeric anthocyanin, and dimensionless volume ( $V/V_0$ ) in the impregnated product. VP had a significant ( $p \leq 0.05$ ) effect on mass transfer parameters, color parameters,  $A_U/A_{OP}$ , and bioactive compounds. However, at 60°Brix and 500 mmHg, the lower  $V/V_0$  values were reached due to cell disruption. Therefore, it is recommended to use a VP = 500 mmHg and  $t$  less than 20 min to significantly impregnate compounds and obtain a product without considerable morphometric modification.

### 1. Introduction

The consumption of grape juice concentrate has demonstrated positive health effects due to some components (Salehi, 2020). The antioxidants and phenolic compounds present in grape juice concentrate have been studied to decrease the risk of cardiovascular diseases (hypertension and hypercholesterolemia) and male infertility (Dohadwala & Vita, 2009; Lamas, Gollücke, & Dolder, 2015). In addition, the high content of glucose (> 50 g/100 g) and fructose (> 41 g/100 g) is one of the reasons why these juices have been used as a substitute for sucrose solutions (Chambi, Lima, & Schmidt, 2016; Trad, Renard, & Harbi, 2021).

Solutes impregnation is a typical process used to increase the composition of a determinate compound or mixture of components in a food matrix to develop a functional food (Bellary & Rastogi, 2016; Mújica-Paz, Valdez-Fragoso, López-Malo, Palou, & Welte-Chanes, 2003a). For example, natural fruit and vegetable juice concentrates have been impregnated to solid fruits to provide bioactive compounds and generate products with high nutritional value quality (Lech, Michalska, Wojdyło, Nowicka, & Figiel, 2018; Peng et al., 2019). In addition, some authors have used the impregnation procedure to

incorporate bioactive compounds in food products to modify their color. For example, they have incorporated anthocyanins of kokum fruit (*Garcinia indica*) (Adsare et al., 2016), blackberry (*Rubus fruticosus* L.) (Grajales-Lagunes et al., 2019), or black carrot (*Daucus carota*) (Yilmaz & Ersus Bilek, 2018).

One of the main limitations of using food impregnation as pretreatment before thermal drying is the long time required (> 12 h) to reduce the product's water activity (Assis, Morais, & Morais, 2017); besides, the mass transfer process does not occur homogeneously throughout the product. Some authors have reported a higher concentration of the osmotic solution in the external part of the product and higher moisture content in the internal part when applying the osmotic procedure (Sette, Franceschinis, Schebor, & Salvatori, 2017). Some limitations of having a high solutes content on the external part of the product include high resistance for the mass transfer and a lower rate through the impregnation (González-Pérez, Ramírez-Corona, & López-Malo, 2021). Additionally, the solutes on the product surface can crystallize or be caramelized when the product is exposed to thermal treatments for moisture reduction (González-Pérez et al., 2019; Sette et al., 2017).

The impregnation of solutes under vacuum conditions is an alternative for homogenizing the solutes in a food matrix. Under vacuum, the

\* Corresponding author.

E-mail address: [aurelio.lopezm@udlap.mx](mailto:aurelio.lopezm@udlap.mx) (A. López-Malo).

<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102981>

Received 31 October 2021; Received in revised form 9 February 2022; Accepted 16 March 2022

Available online 22 March 2022

1466-8564/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Revista Internacional de Investigación e Innovación  
Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

**Sensory evaluation of apple cubes (*Granny Smith* var.) impregnated with concentrated grape juice (*Victoria* var.) subjected to convection drying**

**Evaluación sensorial de cubos de manzana (variedad *Granny Smith*) impregnados con jugo concentrado de uva (variedad *Victoria*) sometidos a secado convectivo**

González-Pérez, J.E., López-Malo, A.

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.  
[julio.gonzalezpz@udlap.mx](mailto:julio.gonzalezpz@udlap.mx); [aurelio.lopezm@udlap.mx](mailto:aurelio.lopezm@udlap.mx)

**Technological innovation:** Drying pre-treatment to enrich the food matrix with solutes that allow improving nutritional composition.

**Area of application:** Food products development and sensory evaluation. Food conservation which allows to extend shelf life as a raw material.

Received: november 20th, 2020

Accepted: july 15th, 2021

### Resumen

En el proceso de deshidratación de frutas se suelen utilizar temperaturas elevadas para reducir el contenido de humedad en poco tiempo. Sin embargo, temperaturas elevadas modifican las características sensoriales debido a la pérdida de compuestos termolábiles, y a las reacciones químicas o enzimáticas que afectan a la aceptación de los frutos deshidratados, siendo parámetros negativos de calidad. El uso de la deshidratación osmótica se ha utilizado como pretratamiento para enriquecer la matriz alimenticia con solutos que mejoran la composición nutricional, proporcionando estabilidad morfológica y de color. El objetivo de este trabajo fue evaluar la cinética de secado de cubos de manzana (var. *Granny Smith*) impregnados con jugo concentrado de uva (var. *Victoria*) para obtener snacks sensorialmente aceptables. El pretratamiento de impregnación se realizó con jugo concentrado de uva (40°Bx, 25°C, 4 g solución/g producto, y 960 min); se determinó el color, la  $a_w$  y la cinética de secado de los cubos de manzana (1.5×1.5×1.5 cm) sometidos a secado por convección (40°C y velocidad del aire de 0.5 m/s). Las curvas de secado se modelaron utilizando los modelos de Newton, Henderson y Pabis, Page, Weibull y la segunda ley de Fick. Los frutos secos pretratados se evaluaron sensorialmente utilizando una escala hedónica de nueve puntos. Los resultados indicaron que las manzanas impregnadas tuvieron una pérdida de agua de 0.53±0.12 g agua/g producto y una ganancia de sólidos de 0.07±0.00 g sólidos/g

## Fruta fortificada con probióticos: una forma de cuidar tu salud

[Portada](#) » [Blog](#) » [Destacada](#) » [Fruta fortificada con probióticos: una forma de cuidar tu salud](#)



### 23 **Fruta fortificada con probióticos: una forma de cuidar tu salud**

May

Destacada, Innovación y tecnología

acarreadores probióticos, bacterias, Contexto, fruta, impregnación, jugos de fruta, microbiota intestinal, Probióticos, salud, tecnologías emergentes, UDLAP, vacío

## Chapter

# Modeling of Drying Kinetics of Fresh and Osmodehydrated Apples during Convective Drying

*Julio Emmanuel González-Pérez, Nelly Ramírez-Corona and Aurelio López-Malo*

## Abstract

This work used different mathematical models to describe the drying kinetics of osmodehydrated apple cubes (Granny Smith var.) with sucrose solution. The osmodehydration pre-treatment was carried out with different concentrations (40–60Brix) of sucrose solution, at 40°C, 10 g solution/g product and 1440 min. The dimensionless volume, water activity and drying kinetics of fresh (1.5 cm by side) and osmodehydrated apple cubes subjected to convective drying (50°C and 3.5 m/s) were investigated. Newton, Henderson and Pabis, Page, Weibull and Fick's second law models were used to describe drying curves. Using osmodehydration as a drying pre-treatment decreased the drying time and product shrinkage with respect to fresh product. Page's model was the best fit ( $R^2 > 0.948$ ), followed by Weibull and Henderson and Pabis model ( $R^2 > 0.907$ ). The Newton model was not adequate to describe drying processes with high mass transfer rate ( $R^2 > 0.775$ ). For the diffusive model, it is required to characterize the real dimensions of the product during the process to achieve a  $R^2 > 0.917$ . Effective water diffusivity of fresh and osmodehydrated apple was  $6.77 \times 10^{-10}$  and  $3.77 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, respectively.

**Keywords:** convective drying, diffusivity, mass transfer, osmotic dehydration, sucrose solution

## 1. Introduction

Convective drying removes water from a wet product by the simultaneous transfer of heat and mass [1, 2]. The process involves using a stream of hot air (provided by an electrical resistance and a propeller fan) that distributes the temperature to one or more drying chambers containing trays with samples [3]. The hot air increases the energy transfer over the product surface by convection and can reach the product interior by conduction or diffusion depending on the product structure and dimensions [4, 5]. At the same time, product moisture is transferred from the product surface to the air by convection and from the product interior by diffusion, convection or capillarity [1]. Thus, the drying rate and the quality of the dried product depend on the external conditions (temperature, relative humidity, airflow speed and





Cite this: DOI: 10.1039/d2fb00036a

## Use of response surface methodology to optimise vacuum impregnation of $\beta$ -carotene from *Daucus carota* in *Pachyrhizus erosus*

Julio E. González-Pérez,<sup>1b</sup> Oscar Jiménez-González,<sup>1b</sup> Nelly Ramírez-Corona<sup>1b</sup> and Aurelio López-Malo<sup>1b\*</sup>

Consuming carotenoid-rich foods prevent and reduce certain types of cancer and cardiovascular and degenerative diseases. In this work, response surface methodology (RSM) was used to maximise  $\beta$ -carotene (from *Daucus carota* juice) vacuum impregnation into *Pachyrhizus erosus* (PEC) cylinders (1 mm diameter by 2 mm length). The impregnation was carried out at 40 °C, an absolute pressure of 51 mm Hg, and a 10 g carrot juice/fresh product ratio. The factors considered were the immersion time ( $t = 20, 30,$  and  $40$  min) and the osmotic agent concentration ( $C = 20, 35,$  and  $50$  °Brix). The polynomial equations obtained to predict solute gain (SG), water loss (WL), total carotenoids (TCs), total soluble solids (TSSs), and water activity ( $a_w$ ) of the product had  $R^2 > 0.846$ . Increasing the osmotic agent concentration increased SG, TC, and TSS values and decreased WL and  $a_w$  values. From the obtained polynomial equations of the analysed responses, a quadratic effect was observed in the processing time due to the saturation of solutes on the product surface. The optimum conditions were  $t = 31$  min and  $50$  °Brix, resulting in an impregnated PEC with a value of  $269 \mu\text{g}$  of  $\beta$ -carotene/100 g dry base,  $19.3$  °Brix, and  $a_w = 0.946$ . It was possible to incorporate carotenoids in PEC by optimising the vacuum impregnation conditions; however, a drying treatment is necessary to increase the shelf life of the obtained product.

Received 28th October 2022

Accepted 13th March 2023

DOI: 10.1039/d2fb00036a

rsc.li/susfoodtech

### 1. Introduction

*Pachyrhizus erosus* is known as Mexican yam, Mexican turnip, yam bean, or "jicama".<sup>1</sup> It is rich in fibre, vitamins (C and B6), and minerals (K, Ca, and P, among others). However, due to its moisture content ranging from 80 to 85% (w.b.), it requires storage in a cool and dry place to avoid spoilage.<sup>2–3</sup> Therefore, drying processes have been used to increase its shelf life. Some quality problems of dried jicama are browning (enzymatic browning), flavour (sweetness) losses, and nutritional value reduction (regarding vitamins, minerals, and antioxidant content).<sup>4</sup>

Food fortification has been a strategy to combat malnutrition due to a lack of micronutrients such as iron, zinc, and vitamin A,<sup>5</sup> which are responsible for various ailments. These include physical deficiencies (congenital disabilities) or cognitive deficiencies (reduced or undeveloped cognitive ability and reduced productivity).<sup>5,6</sup> In this context, food fortification is the addition of micronutrients to increase nutritional value. The term biofortification involves using micronutrients, such as vitamins or minerals, to improve nutritional value through

agronomic practices, conventional plant breeding, or modern biotechnology.<sup>7</sup> In this attempt, Kruger *et al.*<sup>8</sup> mentioned that food-to-food addition could be a strategy to achieve this objective. In addition, food enrichment and fortification have been implemented as a drying pre-treatment to compensate for the nutrient loss or to incorporate new nutrients into foods.<sup>9,10</sup>

An important source of these compounds is the juice from fruits and vegetables, which has high content of these nutrients. In particular, orange carrots contain  $\alpha$  and  $\beta$ -carotene,<sup>11</sup> which have a  $\beta$ -ring and  $\epsilon$ -ring at the beginning and end of a long chain of alternating double bonds. This chain is responsible for the orange, red, and yellow colours.<sup>12</sup> The presence of  $\beta$ -carotene has been related to disease prevention caused by oxidative stress (some cancer types, ageing, vascular atheroma, *etc.*) because they are vitamin A precursors.<sup>13</sup> Therefore, it is important to increase carotenoid content to improve nutritional value and human health.<sup>14</sup>

Impregnation with concentrated juices is currently used because it avoids adding refined sugar and increases bioactive compounds.<sup>15–17</sup> However, this technique requires long impregnation times. Moreover, in some cases, the compounds do not penetrate the product centre, causing a barrier of compounds outside and avoiding the total water outflow.<sup>16,18</sup> In contrast, vacuum impregnation has been proposed to introduce liquids into the porous matrix,<sup>19</sup> improving nutritional

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, San Andrés Cholula, Puebla, C.P. 72810, Mexico. E-mail: aurelio.lopez@udlap.mx



Art-03-JGP



Revista TSIA

Para: Julio Emmanuel Gonzalez Perez



Lun 18/05/2020 12:51

Estimado autor,

*Es un placer informarle que su artículo de revisión:*

***“Modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas: factores de proceso y métodos no térmicos”***

ha sido ***aceptado*** para ser publicado en el **Vol. 14 de la Revista TSIA**.

Se procederá a la revisión de formato editorial y se le contactará posteriormente en caso de requerir realizar últimos cambios, así como su aprobación de la versión final, previo al envío del manuscrito al departamento de publicaciones.

Favor de comunicar a los coautores del artículo.

Quedamos atentos para cualquier duda al respecto.

Saludos cordiales,

*Comité Editorial*

*Revista TSIA- Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*

1 **Modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y**  
2 **hortalizas: factores de proceso y métodos no térmicos**

3 J. E. González-Pérez\*, A. López-Malo

4 Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas  
5 Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

6 \*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos

7 Tel.: +52 222 229 2126

8 Dirección electrónica: julio.gonzalezpz@udlap.mx

**Publicaciones en proceso**

Artículos en proceso son los siguientes en:

1. **González-Pérez, J. E.,** Romo-Hernández, A., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (Enviado). Evaluation of osmodehydration and vacuum-assisted osmodehydration as pre-treatments during fruit drying process: the effect on drying rates, effective water diffusion and changes in product quality

**Confirm co-authorship of submission to Journal of Engineering Research**

Journal: Journal of Engineering Research  
 Title: Evaluation of osmodehydration and vacuum-assisted osmodehydration as pre-treatments during fruit drying process: the effect on drying rates, effective water diffusion and changes in product quality  
 Corresponding Author: Dra. Nelly Ramirez-Corona  
 Co-Authors: Julio Emmanuel González-Pérez; Aarón Romo Hernández; Aurelio López-Malo  
 Manuscript Number: JER-D-23-00238

Dear Julio Emmanuel González-Pérez,

Dra. Nelly Ramirez-Corona submitted this manuscript via Elsevier's online submission system, Editorial Manager, and you have been listed as a Co-Author of this submission.

Elsevier asks Co-Authors to confirm their consent to be listed as Co-Author and track the papers status. In order to confirm your connection to this submission, please click here to confirm your co-authorship:

em Journal of Engineering Research Julio Emmanuel González-Pérez

Home Main Menu Submit a Manuscript About Help

← Submissions Being Processed for Author

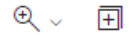
Page: 1 of 1 (1 total submissions)

Results per page 10

Action	Manuscript Number	Title	Authorship	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status
Action Links	JER-D-23-00238	Evaluation of osmodehydration and vacuum-assisted osmodehydration as pre-treatments during fruit drying process: the effect on drying rates, effective water diffusion and changes in product quality	Other Author	Mar 30, 2023	Apr 04, 2023	Under Review

2. **González-Pérez, J. E.,** Jiménez-González., O., Romo-Hernández, A, Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (Enviado) Osmosonication of apple in concentrated grape juice: evaluation of mass transfer rates and impregnation effectiveness

Dictamen: Special Issue "Latin Food: The Food Science, Biotechnology and Safety Congress" Food Research International



📎 5 archivos adjuntos

Estimado/a autor/a de correspondencia,

Por este medio le informamos que el trabajo con código "PP III 4" titulado "**Osmosonication of apple in concentrated grape juice: evaluation of mass transfer rates and impregnation effectiveness**" ha sido aceptado para ser sometido al Special Issue "Latin Food: The Food Science, Biotechnology and Safety Congress" en la revista Food Research International.

**Recomendaciones emitidas por los editores invitados:** mejorar el trabajo y ajustar al scope de la revista.

3. **González-Pérez, J. E.,** Jian, S., Zavala, V.M., Jiménez-González, O., Romo-Hernández, A., Guerrero-Beltrán, J.A., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. (En proceso). Use of Topology to describe the impregnation of apple juice with grape juice: osmodeshydration with atmospheric pressure and assisted with vacuum pressure.
4. **González-Pérez, J. E.,** Jiménez-González, O., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A. (En proceso). Shelf-life prediction of carrot juice-impregnated apple subjected to freeze-drying: packaging film, storage temperature and relative humidity.
5. **González-Pérez, J. E.,** Romo-Hernández, A., , López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. (En proceso). Mass transfer analysis during dehydration of *Pyrus communis* variety "*Lechera*" by microwave drying.

## Publicaciones durante el doctorado

Scientia Horticulturae 288 (2021) 110306



Contents lists available at ScienceDirect

Scientia Horticulturae

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scihorti](http://www.elsevier.com/locate/scihorti)

Review

## Tomatillo or husk tomato (*Physalis philadelphica* and *Physalis ixocarpa*): A review

Julio Emmanuel González-Pérez, José Ángel Guerrero-Beltrán<sup>\*</sup>

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda de Santa Catarina Martín, San Andrés Cholula, Puebla 72810, Mexico

## ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Fruit origin  
Plant  
Botanical aspects  
Chemical composition  
Nutritional compounds  
Health benefits

## ABSTRACT

Tomatillo (*Physalis philadelphica* and *Physalis ixocarpa*) are native fruits to Mexico and Central America. However, the tomatillo plant grows in tropical and subtropical regions around the world. The tomatillo fruit is also called husk tomato. The growth conditions may modify, as for another vegetable, the yield and composition of fruits and seeds. Pests and some microorganisms (transmitted by insects) generate some diseases to the plant. Plants and fruits of tomatillo contains vitamins, minerals, phenolic compounds, and steroidal lactones such as physalins, having antimicrobials and antinarcotic effects. This is why plants and fruits are widely used in traditional medicine to relieve some discomforts: fever, cough, amygdalitis, gastrointestinal disorders or diabetes and as food ingredient in the Mexican and Guatemalan cuisines. The aim of this review was to compile in a single manuscript the whole information about the plant and fruits of tomatillo, considering fruit origin, botanical aspects, cultivation characteristics, components, and health benefits as well as the main uses of fruits and parts of the plant.

## 1. Introduction

Tomatillo belongs to the genus *Physalis* (Greek for "a bladder") (Robledo-Torres et al., 2011). Tomatillo is an annual plant original to Mexico and Guatemala. The plants growth widely in tropical and subtropical regions all over the world, predominantly in some countries of the American continent (Small, 2012; Zhang et al., 2016). Tomatillo fruits are of green, yellow, purple, and purple-green colors, covered with a thin husk (calyx) (Small, 2012; Whitson, 2016). Fruits and plants of *Physalis philadelphica* and *Physalis ixocarpa* species are nutritionally and commercially important (Pretz and Deanna, 2020; Zhang et al., 2016) in several countries. Plants and fruits of tomatillo contains vitamins, minerals, phenolic compounds, secondary metabolites such as physalins and steroids (steroidal lactones). The plant and fruits are widely used in traditional medicine to relieve some ailments (relieve fever, cough, amygdalitis, gastrointestinal disorders or diabetes) and as food ingredient in the Mexican and Guatemalan cuisines (García-Mendieta et al., 2012; González-Chavira et al., 2019; Maldonado et al., 2011).

Some studies have analyzed the characteristics of the main problems found throughout the growth of tomatillo plants. Different microorganisms and insects are responsible of various diseases (Sastry et al.,

2019). Other studies have developed different technical procedures to increase the yield of fruits and components in the fruit throughout the entire germination process, growing of the plant and development of its parts (García-Osuna et al., 2015; Marín-Sánchez et al., 2007; Martínez-Solis et al., 2006; Montejo-Canul et al., 2019; Peña-Lomelí et al., 2018; Robledo-Torres et al., 2011).

Accordingly, the aim of this review was to compile information about the plant and fruits of tomatillo; considering the fruit origin, botanical aspects, cultivation characteristics and their components; in addition to the main uses of the fruit and different parts of the plant.

## 2. Fruit origin and botanical aspects

## 2.1. Names

Tomatillo fruit (husk tomato) is produced by the plants of *P. philadelphica* Lam. and its subspecies *P. ixocarpa* Brot. (Sobrinho-Vesperinas and Sanz-Elorza, 2007). Table 1 shows their main differences. To clarify the taxonomic classification of this species, some studies analyzed cytological and taxonomic characteristics. One of the first differences found was that the peduncle of *P. ixocarpa* is shorter than

<sup>\*</sup> Corresponding author.

E-mail address: [angel.guerrero@udlap.mx](mailto:angel.guerrero@udlap.mx) (J.Á. Guerrero-Beltrán).

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110306>

Received 7 January 2021; Received in revised form 13 April 2021; Accepted 19 May 2021  
0304-4238/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

1 **[In-silico optimization processes of bioactivity from natural compounds]**

2 Cortazar-Moya Sheila, González-Pérez Julio E., Jiménez-González Oscar, Morales-  
3 Camacho Jocksan I., Romo-Hernández Aarón, López-Malo A. \*¶

4 Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas  
5 San Andrés Cholula, Puebla, México¶

6 \*Corresponding author: aurelio.lopezm@udlap.mx¶

7 **Keywords:** *in silico*, natural compounds, homology prediction, molecular dynamics,  
8 molecular evolution events, bioactivity, bioactive peptides, secondary metabolites¶

9 **ABSTRACT¶**

10 The physicochemical properties inherent to natural chemical compounds provide a  
11 foundation for the development of novel drugs and new therapies. Although some natural  
12 product properties are available in various databases, the relevance and the data availability

