



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EFFECTO DE LA ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA Y LA TEMPERATURA SOBRE
LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE FRUTAS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA

TREJO ZÚÑIGA ADRIANA

TUTOR

ALBERTO TECANTE CORONEL

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

2018





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. José Guillermo de Jesús Aguilar Osorio
VOCAL: Dr. Alberto Tecante Coronel
SECRETARIO: M. en C. Gabriela Alatorre García
1er. SUPLENTE: Dr. Roeb García Arrazola
2° SUPLENTE: I. A. Mariana Ramírez Gilly

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 313, DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA, CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alberto Tecante Coronel

SUPERVISOR TÉCNICO:

I.A. Mariana Ramírez Gilly

SUSTENTANTE:

Adriana Trejo Zúñiga

Contenido

Resumen	5
Abstract.....	6
Introducción.....	7
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	
Objetivos.....	8
Hipótesis.....	8
CAPITULO I	
MANZANA	9
1.1. Origen	9
1.2. Características morfológicas	9
1.3. Valor nutricional	10
1.4. Producción nacional	10
1.5. Producción mundial.....	11
1.6. Normatividad	11
CAPITULO II	
PAPAYA	14
2.1. Origen.....	14
2.2. Características morfológicas	14
2.3. Valor nutricional	15
2.4. Producción nacional.....	15
2.5. Producción mundial	16
2.6. Normatividad	17
CAPITULO III	
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA	18
3.1. Cinética del proceso de deshidratación osmótica	19

3.2. Modelo matemático	20
3.3. Solución de Crank	21
3.4. Aplicaciones	22
3.5. Ventajas	22
3.6. Desventajas	23
CAPITULO IV	
ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA	24
4.1. Equipos	25
4.2. Proceso de presurización	26
4.3. Efecto de la alta presión sobre los constituyentes de los alimentos	27
4.4. Ventajas	28
4.5. Desventajas	29
4.6. Aplicaciones de las APH en la industria alimentaria	29
4.7. Efecto combinado entre la deshidratación osmótica y la APH	30
CAPITULO V	
MATERIALES Y MÉTODOS	32
5.1. Materia prima	32
5.2. Disolución hipertónica	33
5.3. Diagramas de trabajo experimental	33
5.4. Procesamiento con altas presiones hidrostáticas	35
5.5. Deshidratación osmótica	36
5.6. Determinaciones	36
5.6.1. Sólidos solubles	36
5.6.2. Humedad	36
5.7. Mediciones durante la deshidratación osmótica	37
5.8. Cinética de deshidratación osmótica. Modelo de Peleg	38
5.9. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica	39
5.9.1. Coeficientes de difusividad efectiva de agua y solutos	40
5.10. Índice de efectividad	43
5.11. Parámetros cinéticos k_{WL} y k_{SG}	43
5.12. Análisis estadístico	44
CAPITULO VI	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
6.1. Deshidratación osmótica en placas de fruta	45
6.2. Cinética de deshidratación osmótica. El modelo de Peleg	64
6.3. Transferencia de masa. Difusividad efectiva	68
6.4. Índice de efectividad	72
6.5. Rapidez de transferencia de masa. k_{WL} y k_{SG}	76
CONCLUSIONES	80
REFERENCIAS	82
ANEXOS	88
Índice de Figuras de Anexo 1.....	88
Índice de Tablas de Anexo 2.....	90
Modelo de Peleg	91
Análisis de Varianza y método de Tukey	103

Lista de Abreviaturas

°C: Grados Celsius.

APH: Altas Presiones Hidrostáticas.

Bar: Unidad de presión con equivalencia a 1 atm aproximadamente.

cm: Centímetros.

CODEX: CODEX Alimentarius o Código alimentario.

De: Difusividad efectiva, expresada en m^2/s .

DMS: Diferencia minima significativa.

DO: Deshidratación Osmótica.

EUA: Estados Unidos de América.

EVOH: Polímero de Etilen-Vinil-Alcohol.

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

g: Gramo.

H: Humedad.

i.e.: Del latín *Id est*, que significa “es decir”.

IE: Índice de Efectividad.

Kcal: Kilocaloría.

kJ: Kilojoules.

k_{WL} : Constante de rapidez de pérdida de agua, expresada en $s^{-0.5}$.

k_{SG} : Constante de rapidez de ganancia de sólidos, expresada en $s^{-0.5}$.

μg : Microgramos.

mg: Miligramo.

min: Minutos.

MPa: Megapascal.

NMX: Norma Mexicana.

pH: Potencial Hidrogeno.

Psi: Unidad de presión, libra-fuerza por pulgada cuadrada (Pounds- force per square inch).

r^2 : Coeficiente de determinación, o cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson.

SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

s: Segundos.

S_G : Ganancia de sólidos.

SIACON: Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta.

S_S : Sólidos secos.

t: Tiempo, expresado en segundos.

W_L : Pérdida de agua.

Índice de figuras

- Figura 1. Manzana Chihuahua (SAGARPA, 2013).
- Figura 2. Volumen de producción de manzana en México (SAGARPA, SIACON, 2015).
- Figura 3. Valor de producción de manzana en México (SAGARPA, SIACON, 2015).
- Figura 4. Planta de papayo (SAGARPA, 2009).
- Figura 5. Volumen de producción (ton) de papaya maradol en México (SAGARPA, SIACON, 2015).
- Figura 6. Valor de producción de papaya maradol en México (SAGARPA, SIACON, 2015).
- Figura 7. Fenómeno de transporte de masa durante la deshidratación osmótica (Torreggiani, 1993).
- Figura 8. Niveles de presión de diferentes sistemas (Tecnología HPP Hiperbaric, 2015).
- Figura 9. Diagrama de trabajo experimental de la deshidratación osmótica de placas de fruta sin tratamiento previo con APH.
- Figura 10. Diagrama del trabajo experimental de la deshidratación osmótica de placas de fruta con tratamiento previo con APH.
- Figura 11. Variación de humedad (%) en placas de manzana Chihuahua deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y altas presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.
- Figura 12. Contenido de humedad (%) de placas de papaya maradol deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.
- Figura 13. Contenido de sólidos secos (%) de placas de manzana Chihuahua deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.
- Figura 14. Contenido de sólidos secos (%) de placas de papaya maradol deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.
- Figura 15. Pérdida de agua (W_L) promedio ($n = 2$) de placas de manzana Chihuahua en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.
- Figura 16. Pérdida de agua (W_L) promedio ($n = 2$) de placas de papaya maradol en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.
- Figura 17. Ganancia de sólidos (s_G) promedio ($n = 2$) de placas de manzana Chihuahua en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

- Figura 18. Ganancia de sólidos (s_G) promedio ($n = 2$) de placas de papaya maradol en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.
- Figura 19. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, para placas de manzana Chihuahua en disoluciones con 60% de sacarosa a diferentes temperaturas y sin aplicación de APH.
- Figura 20. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, para placas de manzana Chihuahua en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones.
- Figura 21. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, en placas de papaya maradol en disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y sin aplicación de APH.
- Figura 22. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, en placas de papaya maradol en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones.
- Figura 23. Índice de efectividad para diferentes tiempos de deshidratación osmótica para manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 30 °C y con tratamiento a diferentes presiones.
- Figura 24. Índice de efectividad para diferentes tiempos de deshidratación osmótica, para manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 40 °C y con tratamiento a diferentes presiones.
- Figura 25. Índice de efectividad para diferentes tiempos en papaya maradol deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 30 °C y con tratamiento a diferentes presiones.
- Figura 26. Índice de efectividad para diferentes tiempos en papaya maradol deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 40 °C y con tratamiento a diferentes presiones.

Índice de Tablas

Tabla 1. Factores nutricionales de la manzana (USDA, 2015).

Tabla 2. Clasificación comercial por tamaño, en función del diámetro ecuatorial para manzana (NMX-FF-061-SCFI-2003).

Tabla 3. Porcentajes mínimos de color predominante por grupos de colores y grados de calidad en manzana (NMX-FF-061-SCFI-2003).

Tabla 4. Factores nutricionales de la papaya maradol (Milind, 2011).

Tabla 5. Tratamientos de placas de manzana y papaya.

Tabla 6. Indicadores de deshidratación osmótica iniciales y finales de los tratamientos de placas de manzana Chihuahua.

Tabla 7. Indicadores iniciales y finales de deshidratación osmótica para los tratamientos de placas de papaya maradol.

Tabla 8. Parámetros del modelo de Peleg, k_1 y k_2 , error relativo y coeficiente de correlación para los diferentes tratamientos de placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente.

Tabla 9. Parámetros del modelo de Peleg, k_1 y k_2 , error relativo y coeficiente de correlación para los diferentes tratamientos de placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente.

Tabla 10. Difusividad efectiva de W_L y S_G en manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente.

Tabla 11. Difusividad efectiva de W_L y S_G en papaya maradol deshidratada osmóticamente.

Tabla 12. Valores de k_{WL} y k_{SG} , y su respectivo coeficiente de correlación para manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente.

Tabla 13. Parámetros cinéticos, k_{WL} y k_{SG} , y su respectivo coeficiente de correlación para papaya maradol deshidratada osmóticamente.

Resumen

El propósito de este trabajo fue determinar el efecto individual y combinado de la alta presión hidrostática (APH) con la temperatura sobre la deshidratación osmótica de placas de manzana Chihuahua y papaya maradol. El efecto se determinó calculando el contenido de humedad, sólidos secos, pérdida de agua, ganancia de sólidos, con un posterior análisis de la cinética de deshidratación, transferencia de masa e índice de efectividad. Se aplicaron altas presiones hidrostáticas de, 200 y 400 MPa a las placas de fruta durante cinco minutos antes de ser deshidratadas osmóticamente en disoluciones hipertónicas con 60 g/100 g (60 %) de sacarosa a 30 y 40 °C durante cinco horas. Su comportamiento fue comparado con controles no presurizados sometidos a las mismas condiciones de deshidratación. Se usaron distintas ecuaciones para determinar la pérdida de agua y la ganancia de sólidos secos. La cinética de deshidratación se analizó con el modelo de Peleg. La transferencia de masa se evaluó mediante la difusividad efectiva determinada con la solución de la segunda ley de Fick.

El aumento de la presión y la temperatura favorecieron la transferencia de masa en las placas de fruta. Los tratamientos sometidos a la mayor presión y temperatura mostraron la menor humedad final, así como el mayor contenido de sólidos secos. El modelo de Peleg describió adecuadamente los tratamientos sin APH. La presión y la temperatura no tuvieron efecto significativo sobre la difusividad efectiva. Sin embargo, hubo un efecto significativo de la presión sobre la pérdida de agua y la ganancia de sólidos atribuido a posibles cambios en el estado físico de la integridad del tejido vegetal.

Abstract

The purpose of this work was to determine the individual and combined effect of high hydrostatic pressure (HHP) and temperature on the osmotic dehydration of apple Chihuahua and papaya maradol. This effect was determined by calculating the moisture content, dry solids, water loss, solids gain, and analyzing the dehydration kinetics, mass transfer and the effectiveness index. High hydrostatic pressures of 200 and 400 MPa were applied to fruit slabs during five minutes before they were osmotically dehydrated in hypertonic solutions with 60 g/100 g (60 %) sucrose at 30 and 40 °C for five hours. Different equations were used to determine the water loss and solids gain. The dehydration kinetics was determined using the Peleg model. Mass transfer was assessed by the effective diffusivity determined from the solution of Fick's second law.

The increase in pressure and temperature favors mass transfer in the fruit slabs. The treatments subjected to the higher pressure and temperature showed the lowest final moisture, and the higher dry solids content. The Peleg model adequately described the treatments without APH. Pressure and temperature did not show a significant effect on the effective diffusivity. However, there was a significant effect on the water loss and solids gain attributed to possible changes in the physical state of the vegetal tissue.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda del consumidor por alimentos mínimamente procesados, así como por procesos en los que se utiliza una mínima cantidad de energía, está impulsando el desarrollo de nuevos métodos y tecnologías de conservación. Tal es el caso de los métodos “no térmicos”, con los cuales se pueden obtener productos con valor añadido, alta calidad nutritiva y sensorial, dado que conservan sus cualidades nutricionales y organolépticas originales (Herrero, 2006). Por esta razón, la tecnología de altas presiones hidrostáticas (APH), ha tomado gran interés en la industria alimentaria debido a que es efectiva en la conservación de alimentos, porque permite que estos mantengan sus características organolépticas casi intactas. Además, se la considera un proceso en el cual no se generan desechos. Las presiones que se utilizan abarcan entre 100 y 1000 MPa (Daoudi, 2004; Knorr 1993).

Por otro lado, el empleo de procesos que utilizan una menor cantidad de energía ha tomado gran importancia debido a que en los últimos tiempos el costo de los combustibles fósiles y la energía eléctrica ha aumentado. Es por esto que en este trabajo se empleó la deshidratación osmótica (DO), que consiste en la extracción de agua de un alimento, el cual se sumerge en una disolución hipertónica a un tiempo y una temperatura específicos (Barat, 1998). La principal aplicación del proceso de DO es como pretratamiento a otros procesos de conservación de materiales biológicos, con el propósito de mejorar la calidad de los productos terminados, reducir el tiempo de proceso de secado y ahorrar energía (Falade & Igbeka, 2007).

En este trabajo se emplearon los dos procesos: deshidratación osmótica y altas presiones hidrostáticas, con el fin de determinar la acción que se produce al combinarlos sobre la cinética de deshidratación de placas de papaya maradol y manzana Chihuahua. Cada placa tuvo una masa y un espesor determinados. Las placas se sometieron a distintos tratamientos. Se varió la presión hidrostática aplicada previamente a la DO, y la temperatura de la disolución hipertónica durante la deshidratación osmótica, con el fin de conocer la cinética del proceso y así poder comparar los efectos de las altas presiones hidrostáticas sobre la deshidratación osmótica de estas frutas. La cinética de la deshidratación osmótica se determinó por medio de la pérdida de humedad y la ganancia de sólidos. Se empleó la segunda ley de difusión de Fick y el modelo de Peleg, se calcularon las constantes cinéticas k_{WL} y k_{SG} , el coeficiente de difusividad efectivo para la pérdida de agua y la ganancia de sólidos.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo General

Determinar el efecto combinado de presión-temperatura sobre la pérdida de agua y ganancia de sólidos durante el proceso de deshidratación osmótica en placas de fruta, con el propósito de disminuir la humedad para obtener alimentos con humedad intermedia.

Objetivos particulares

- 1) Determinar y comparar el efecto del tratamiento previo con APH a 200 y 400 MPa, en el proceso de DO de placas de fruta.
- 2) Determinar el efecto de la temperatura de las disoluciones hipertónicas de sacarosa, empleadas en la deshidratación osmótica de placas de fruta.
- 3) Analizar si el modelo de Peleg predice correctamente la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en tratamientos con y sin APH para disponer de una expresión que describa el proceso.
- 4) Determinar la cinética de deshidratación osmótica por medio del cálculo de la tasa de deshidratación, difusividad efectiva, índice de efectividad y las constantes de rapidez para W_L y S_G (k_{WL} y k_{SG}).

Hipótesis

Al someter rebanadas de fruta a altas presiones hidrostáticas aumentará la tasa de transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica, aumentando así la ganancia de sólidos y la pérdida de agua en el producto final, en comparación con placas de fruta sin tratar con APH. Del mismo modo se observará un aumento en la tasa de transferencia de sólidos y pérdida de agua al aumentar la temperatura de la disolución hipertónica.

CAPITULO I

MANZANA

1.1 Origen

El manzano, *Malus domestica* Borkh, proviene del Cáucaso. Es un frutal caducifolio, es decir, pierde las hojas en la época de invierno en las zonas templadas para resistir las bajas temperaturas. El manzano, denominado de forma general como *Malus*, pertenece a la familia *Rosaceae*, en la cual se han reconocido hasta 78 especies primarias. Los manzanos domésticos se derivan principalmente del *Malus pumila* Mill. En este trabajo se empleó la variedad Chihuahua.

1.2. Características morfológicas

El fruto es un pomo, como se muestra en la Figura 1, que se caracteriza por tener un ovario ínfero con un endocarpio lignificado, es una fusión entre ovario y receptáculo, y las semillas nacen en cinco carpelos formados de tejidos del mesocarpio y el receptáculo. El fruto es oblongo, cónico u oblicuo, con diámetro entre 2 a 13 cm, presenta varias tonalidades: verdes, amarillas y rojas. Según el cultivo, algunos maduran en solo 70 días, mientras otros necesitan 180 días o más (Baugher, 2003). La manzana es considerada una fruta climatérica, por lo tanto incrementa marcadamente su ritmo de respiración así como la producción de etileno durante la maduración organoléptica, por el contrario las frutas no climatéricas no contienen almidón y maduran únicamente en la planta (Belitz,2004).



Figura 1. Manzana Chihuahua (SAGARPA, 2013).

1.3 Valor nutricional

La manzana es una fuente de fibra y de potasio. Se le atribuye ayudar a reducir la presión arterial. Su composición nutricional se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores nutricionales de la manzana (USDA, 2015).

Cantidad por 100 g					
Energía	52 kcal	Lípidos	0.17 g	Riboflavina	0.026 mg
Agua	85.56 g	Potasio	107 mg	Niacina	0.091 mg
Hidratos de carbono	13.81 g	Vitamina C	4.6 mg	Fósforo	11 mg
Fibra dietaria	2.4 g	Folato	3 g	Calcio	6 mg
Azúcar	10.39 g	Vitamina K	2.2 g	Magnesio	5 mg
Proteína	0.26 g	Vitamina A	3 g	Hierro	0.12 mg

1.4 Producción nacional

En México la producción de manzana ha ido en aumento en los últimos años, con excepción del año 2012, donde se aprecia una baja en la producción. 2015 es el año con mayor producción de esta fruta a nivel nacional (Figura 2). Esto dio como resultado un valor de producción de 4300 millones de pesos (Figura 3).

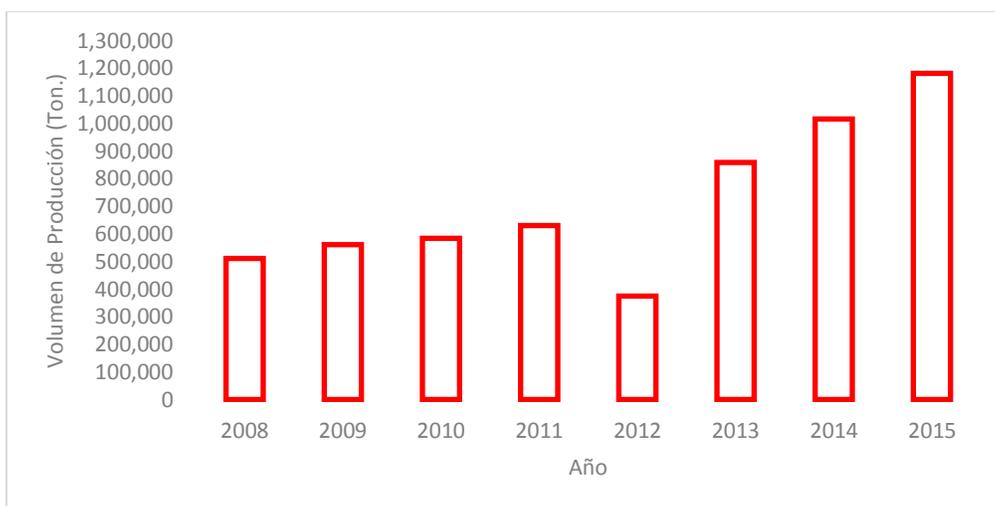


Figura 2. Volumen de producción de manzana en México (SAGARPA, SIACON, 2015).

El estado con una mayor producción de manzana es Chihuahua, con un 80 % de la producción nacional. El segundo lugar de producción de manzana es el estado de Durango con 8 %, seguido de Coahuila con 5 % (SAGARPA, SIACON, 2015).

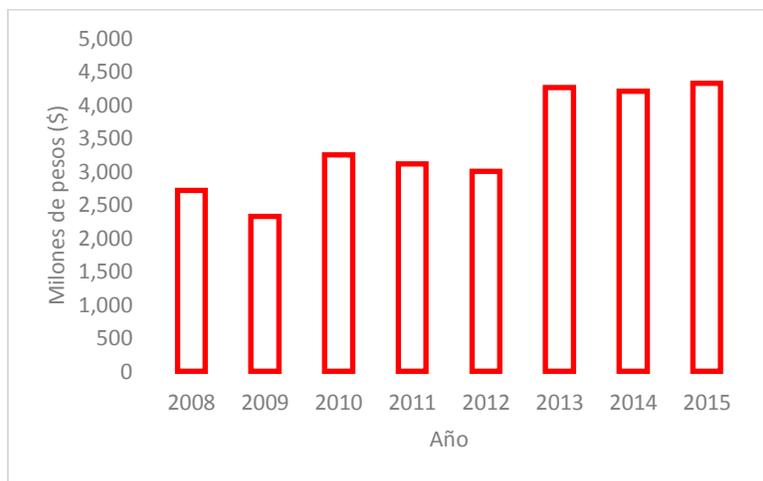


Figura 3. Valor de la producción de manzana en México (SAGARPA, SIACON, 2015).

1.5. Producción mundial

China es el mayor productor de manzana a nivel mundial. En el periodo 2008-2013 produjo un promedio de 34 mil toneladas, lo que representa 78 % de la producción mundial, seguido de Estados Unidos de América con 10, Turquía con 6 y Polonia con 6 (FAO stat, 2013).

1.6. Normatividad

De acuerdo con la norma mexicana NMX-FF-061-SCFI-2003: "Productos agrícolas no industrializados para consumo humano. Fruta fresca. Manzana (*Malus pumila* Mill), (*Malus domestica* Borkh). Especificaciones", se establecen las características de calidad que debe cumplir la manzana (*Malus pumila* Mill)-(*Malus domestica* Borkh) en estado fresco destinada al consumo humano, las cuales se citan a continuación:

1.6.1. Las manzanas deben de presentar estos requisitos mínimos

- 1) Ser de una sola variedad.
- 2) Estar enteras, de consistencia firme y aspecto fresco.

- 3) Sanas, exentas de podredumbre o deterioro, que les permita ser aptas para el consumo humano.
- 4) Exentas de coloración café en la pulpa y daño por congelamiento.
- 5) Exenta de daños por frío y mancha amarga.
- 6) Estar exentas de magulladuras pronunciadas.
- 7) Estar exentas de daños por plagas.
- 8) Estar limpias y prácticamente exentas de materia extraña visible.
- 9) Exentas de humedad anormal, salvo la condensación consiguiente a su remoción de una cámara frigorífica.
- 10) Estar exentas de cualquier olor y/o sabor extraño.

1.6.2. Madurez

- 11) Las manzanas deben haber completado su desarrollo fisiológico y presentar el color, sabor, textura y aroma característicos de la variedad.
- 12) En las variedades rojas y bicoloreadas o parcialmente rojas, el contenido mínimo de sólidos solubles totales debe ser de 11 % y la firmeza de la pulpa o resistencia a la penetración de 5,0 kg.

1.6.3. Tamaño

El tamaño de las manzanas se determina con base en el peso unitario o el diámetro ecuatorial de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación comercial por tamaño, en función del diámetro ecuatorial para manzana (NMX-FF-061-SCFI-2003).

Designación comercial	Diámetro ecuatorial mínimo requerido (cm)
Extra	7.2
Primera	6.6
Segunda	6.2
Tercera	5.6
Canica	Menor de 4.0

1.6.4. Color

Las variaciones comerciales de manzanas se dividen en cuatro grupos de acuerdo a su coloración; para cada grupo de colores, los frutos de cada variedad requieren cubrir con el color predominante por lo menos el porcentaje del área total del fruto que señala la Tabla 3.

Tabla 3. Porcentajes mínimos de color predominante por grupos de colores y grados de calidad en manzana (NMX-FF-061-SCFI-2003).

Colores/Varietades	México extra (%)	México 1 (%)	México 2 (%)
Varietades rojas	75	66	40
Varietades bicoloradas o parcialmente rojas	50	33	15
Varietades amarillas chapeadas	25	10	-
Varietades amarillas y/o verdes	75	75	75

CAPITULO II

PAPAYA

2.1. Origen

La papaya es el fruto de un árbol que se conoce como papayo mostrado en la Figura 4. Su nombre científico es *Carica papaya L.* y pertenece a la familia *Caricaceae*. Las papayas son frutas tropicales nativas de México y Centroamérica (Féito & Portal, 2013). Gracias a la semejanza entre la forma de las hojas del papayo y las de la higuera, el naturalista y botánico Carlos Linneo denominó a la papaya como “Carica”, que procede del griego “karike” y corresponde con el nombre de higuera. “Papaya” es una adaptación de su nombre nativo caribeño. De la unión de estos se origina su nombre científico *Carica papaya*. En México en la lengua náhuatl se le daba el nombre de “ochonetli” al fruto y “ochonecuahuitl” a la planta (SAGARPA, 1999). Al igual que la manzana, la papaya es un fruto climatérico, por lo tanto aumenta la producción de CO₂ una vez que la fruta está completamente madura (Belitz, 2004).



Figura 4. Planta de papayo (SAGARPA, 1999).

2.2. Características morfológicas

Los frutos se encuentran apiñados alrededor del tronco. Son bayas elipsoides a esféricas, tornándose de verdes a anaranjadas en la madurez, de pulpa blanda y jugo lechoso. El fruto cultivado mide de 10 a 50 cm de largo, dependiendo del cultivo y de su ubicación en la planta. Su color externo es amarillo-naranja brillante y presenta un intenso color interior rojo-salmón que la hace muy apreciada por el consumidor. En la papaya maradol prevalecen las frutas alargadas cuyo tamaño varía entre 22 y 27

cm, con un diámetro entre 9 y 13 cm, el diámetro de la cavidad mide entre 3 y 4.5 cm. En México se cultivan diferentes variedades que se han nombrado en función del tamaño, forma, apariencia y procedencia de la fruta. Así, tenemos que la variedad hawaiana tiene frutos pequeños entre 400 y 600 g, la maradol roja de origen cubano tiene frutos entre 1.5 y 2.5 kg y los tipos criollos cera y mamey varían entre 2 y 6 kg. Las semillas son producidas abundantemente, se concentran en el saco seminal dispuesto en su cavidad central, son esféricas y cada una está rodeada de un tejido mucilaginoso llamado sarcotesta, presentan un color pardo negruzco y de forma arrugada, cada fruto contiene de 200 a 400 semillas.

2.3. Valor nutricional

La papaya es una fuente de vitaminas A, C, E y K así como de folato y fibra. Es un alimento bajo en grasa, colesterol y sodio, como puede observarse en la Tabla 4 (Milind, 2011).

Tabla 4. Factores nutricionales de la papaya maradol (Milind, 2011).

	Cantidad por 100 g		Cantidad por 100 g
Energía	163 kJ (39 kcal)	Niacina (vit. B ₃)	0.338 mg
Hidratos de carbono	9.81 g	Vitamina B ₆	0.10 mg
Azúcar	5.90 g	Vitamina C	61.8 mg
Fibra dietaria	1.8 g	Calcio	24 mg
Grasa	0.14 g	Hierro	0.10 mg
Proteína	0.61 g	Magnesio	10 mg
Vitamina a	55 µg	Fosforo	5 mg
Beta-caroteno	276 µg	Potasio	257 mg
Tiamina (vit. B ₁)	0.04 mg	Sodio	3 mg
Riboflavina (vit. B ₂)	0.05 mg		

2.4. Producción nacional

En México, en los últimos años, la producción de papaya se ha mantenido estable produciendo en el año 2015 un total de 880 mil toneladas, con un valor de la producción de 4000 millones de pesos (Figuras 5 y 6).

El estado con mayor producción de papaya es Oaxaca, el cual produce el 33 % de la producción nacional seguido de Chiapas con 24 %, Veracruz con 15 % y Colima con 14 % (SAGARPA, SIACON, 2015).

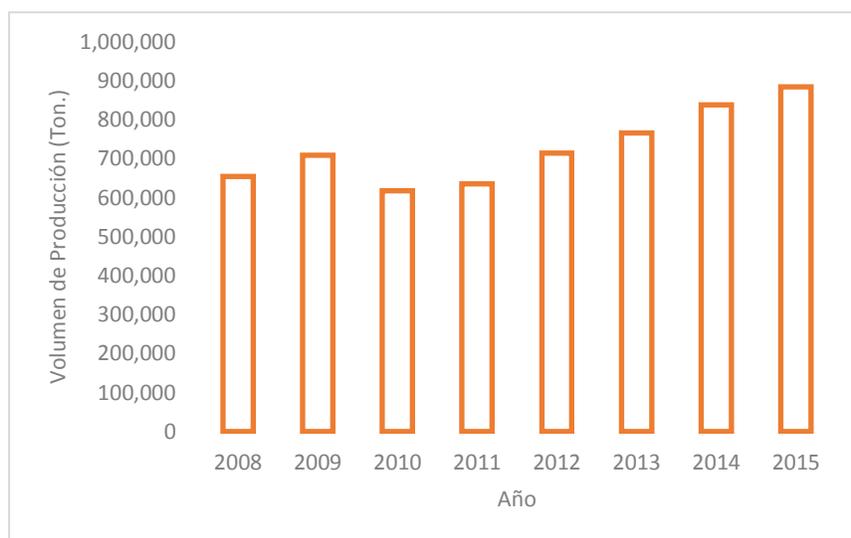


Figura 5. Volumen de producción (ton) de papaya maradol en México (SAGARPA, SIACON, 2015).

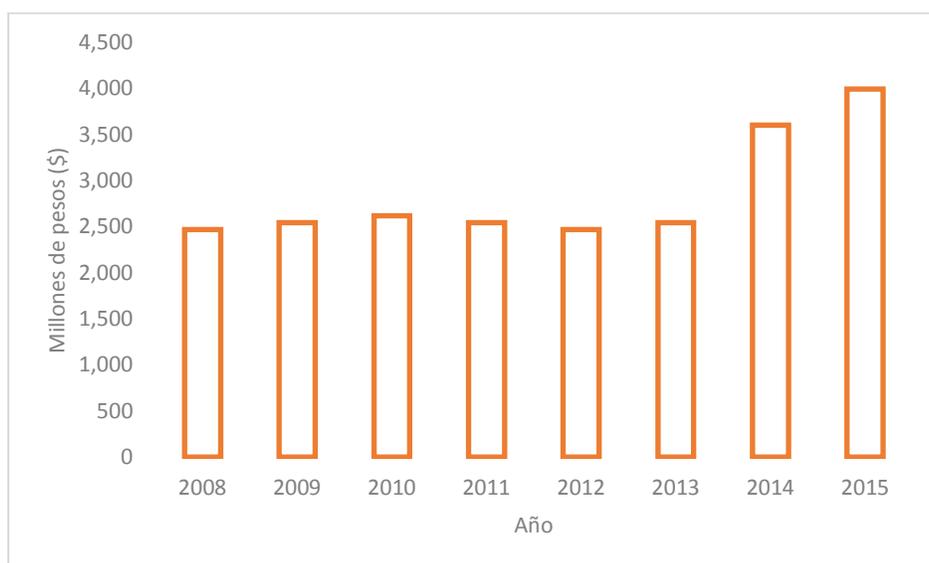


Figura 6. Valor de la producción de papaya maradol en México (SAGARPA, SIACON, 2015).

2.5. Producción mundial

A nivel mundial, India es el principal productor de papaya. En el año 2013 su producción fue de 5 millones de toneladas, lo que representa 46 % de la producción mundial, seguido de Brasil con 13, Indonesia con 7, y Nigeria al igual que México con el 6 por ciento de la producción. México ocupa el cuarto lugar de producción de papaya a nivel mundial empatado con Nigeria con una producción de 764 mil toneladas en el año 2013 (FAO stat, 2013). Los tres principales exportadores de papaya son México, Brasil y Belice. Juntos representaron 63.28 % del comercio mundial entre 2007 y 2009. Durante este periodo México fue el principal exportador de papaya, lo que representa alrededor del

41 % del comercio. La mayoría de las exportaciones de México se envían a los mercados estadounidenses y canadienses (FAO stat, 2013).

2.6. Normatividad

De acuerdo con la norma mexicana “NMX-FF-041-SCFI-2007: Productos alimenticios no industrializados para consumo humano. Fruta fresca. Papaya (*Carica papaya*). Especificaciones”, y a la norma del CODEX para la papaya: CODEX STAN 184-1993, la papaya debe de cumplir con las siguientes especificaciones mínimas para ser apta para consumo humano:

2.6.1. Requisitos mínimos que las papayas deberán presentar

- 1) Estar enteras.
- 2) Estar sanas, y exentas de podredumbre o deterioro que hagan que no sean aptas para el consumo.
- 3) Estar limpias, y prácticamente exentas de cualquier materia extraña visible.
- 4) Estar prácticamente exentas de plagas que afecten al aspecto general del producto.
- 5) Estar prácticamente exentas de daños causados por plagas.
- 6) Estar exentas de humedad externa anormal, salvo la condensación consiguiente a su remoción de una cámara frigorífica.
- 7) Estar exentas de cualquier olor y/o sabor extraños.
- 8) Ser de consistencia firme.
- 9) Tener un aspecto fresco.
- 10) Estar exentas de daños causados por bajas y/o altas temperaturas.

2.6.2. Madurez

Las papayas deberán haber alcanzado un grado apropiado de desarrollo y madurez, teniendo en cuenta las características de la variedad y/o tipo comercial y la zona en que se producen.

El desarrollo y condición de las papayas deberán ser tales que les permitan:

- Soportar el transporte y la manipulación.
- Llegar en estado satisfactorio al lugar de destino.

CAPITULO III

DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

La deshidratación osmótica (DO) es un proceso que consiste en la extracción de agua de un producto que se sumerge en una disolución hipertónica a un tiempo y una temperatura específicos. La extracción se debe a la fuerza impulsora que se crea por la alta presión osmótica, o por la baja actividad de agua, de la disolución debido al gradiente de concentración entre la disolución y el sólido (Rastogi & Raghavarao, 1996). Con ello se reduce hasta un 80 % del agua original de los alimentos y, se producen alimentos con humedad intermedia, los cuales presentan un porcentaje de humedad entre 25 y 50 (Badui, 2013; Barat, 1998). Durante la deshidratación osmótica, la fase líquida del alimento está separada de la disolución osmótica por las membranas celulares del alimento, las cuales son semipermeables. Por lo tanto, el equilibrio entre las fases se logra cuando se igualan los potenciales químicos en ambas fases, lo que depende principalmente de la reducción de la actividad de agua dentro de la membrana celular del alimento por medio del intercambio de agua y sólidos (Waliszewski, 2002; Shi & Le Maguer, 2002b; Sablani & Rahman, 2003; Parjoko, 1996). En consecuencia, la DO es un proceso de contra-difusión simultáneo de agua y solutos (Saputra, 2001), en el que ocurren tres tipos de transferencia de masa en contracorriente (Figura 7):

- I. Flujo de agua desde el producto hacia la disolución.
- II. Transferencia de soluto desde la disolución hacia el producto.
- III. Salida de solutos desde el producto hacia la disolución. Los solutos incluyen azúcares, ácidos orgánicos, minerales y vitaminas que forman parte del sabor, el color y el olor (Sablani & Rahman, 2003).

El último flujo se desprecia para todos los efectos de modelación ya que, aunque es importante en las características organolépticas y nutricionales del alimento, es muy pequeño comparado con los otros dos flujos. La transferencia de masa ocurre en regiones específicas del tejido de acuerdo con la estructura celular, i.e.¹ la pared celular, la membrana celular y los espacios extracelulares e intercelulares, (Shi & Le Maguer, 2002a).

Los solutos que normalmente se utilizan en las disoluciones osmóticas son de bajo costo, tales como sacarosa, glucosa, fructosa, cloruro de sodio, glicerol, sorbitol y combinaciones de estos, presentando un efecto sinérgico, como es el caso de la mezcla sacarosa-cloruro de sodio. Generalmente, las

¹ i. e.: Del latín *Id est*, que significa “es decir”.

disoluciones de sacarosa son usadas para frutas y las de cloruro de sodio para verduras (Lerici, 1985).

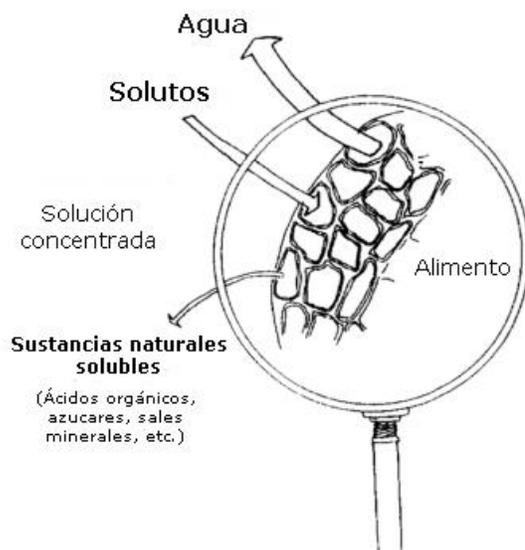


Figura 7. Fenómeno de transporte de masa durante la deshidratación osmótica (Torreggiani, 1993).

3.1. Cinética del proceso de deshidratación osmótica

La cinética del proceso de DO está determinada por: La aproximación al equilibrio, la presión osmótica diferencial inicial entre el alimento y el agente osmótico y por las velocidades de difusión de agua y de soluto (Azuara, 2002). A su vez estas velocidades de difusión están controladas usualmente por el transporte de humedad en el producto y por la estructura de la fruta, i.e. su porosidad (Saputra, 2001). El proceso de DO se caracteriza por tener periodos dinámicos y de equilibrio. En el periodo dinámico, las velocidades de transferencia de masa varían hasta alcanzar el equilibrio en el cual la tasa neta de transporte de masa es cero (Sablani & Rahman, 2003; Parjoko, 1996; Shi & Le Maguer, 2002b). Las variables que afectan la transferencia de masa durante la DO son:

- a) Propias del producto: Composición, porosidad, tamaño, forma y área superficial, presencia de piel, tratamientos previos.
- b) De la disolución osmótica: Concentración, temperatura, tiempo de inmersión, composición de la disolución, peso molecular y naturaleza del soluto, presión de trabajo, nivel de agitación y relación disolución-producto (Lerici, 1985; Sablani & Rahman, 2003; Rastogi & Raghavarao, 1996; Rastogi & Raghavarao, 2002).

3.2. Modelo matemático

Para desarrollar y aplicar un modelo fenomenológico que describa la transferencia de masa en la DO, se deben conocer los fundamentos relacionados con la fisicoquímica y la termodinámica del sistema, así como los mecanismos y las cinéticas de transferencia de masa. En lo relacionado con la fisicoquímica, el sistema alimento-disolución osmótica se considera multicomponente y polifásico. Las fases presentes son la disolución osmótica, la matriz sólida del producto, la fase líquida interna del alimento, intra y extracelular, y la fase gaseosa atrapada en la estructura porosa. Con respecto a la termodinámica, en general, el sistema se encuentra muy alejado del equilibrio, lo que provoca espontáneamente los fenómenos de transporte, aunque durante el proceso ocurren estados de pseudo-equilibrio, que están controlados por la cinética (Barat, 1998). En lo que se refiere a los mecanismos de transferencia de masa, pueden presentarse los siguientes tipos (Barat, 1998; Shi, 2002 a):

- Mecanismos dependientes del gradiente de concentración, que incluyen los mecanismos osmóticos y Fickianos, i.e. de difusión, y que se ven afectados principalmente por la permeabilidad de la membrana a los diferentes componentes.
- Mecanismos dependientes del gradiente de presión, que son los mecanismos hidrodinámicos (HDM) inducidos por la aplicación de vacío o por las tensiones liberadas en el proceso de relajación y que están condicionados por la estructura del alimento, i.e. su porosidad.
- Mecanismos de vaporización-condensación cuando se trabaja a presiones cercanas a la presión de vapor.

Con respecto a los mecanismos descritos en el primer punto, como los Fickianos y los mecanismos osmóticos, es de principal importancia la difusión, la cual es uno de los mecanismos de transferencia de masa como la convección.

La difusión ocurre cuando hay una transferencia de masa del lugar de mayor concentración al de menor concentración, hasta que ya no hay gradiente de concentración y la velocidad de transferencia es cero. La difusión, entonces, podemos definirla como un movimiento relativo de una especie respecto a la mezcla y depende de qué tan desviado se encuentre del equilibrio, es decir de qué tanta diferencia de concentración haya. En el caso de la deshidratación osmótica ocurren dos tipos de transferencia de masa: la difusión de agua desde el alimento hacia la disolución y la difusión de solutos desde la disolución hacia el alimento. En el primer tipo, la fuerza conductora de la transferencia de masa es la diferencia de presión osmótica, mientras que en la segunda es la diferencia de concentraciones (Barbosa, 2000). La alta complejidad del sistema hace que sea difícil

predecir con precisión cuando se usan modelos matemáticos rigurosos y que esta dependa de la determinación apropiada de las condiciones de equilibrio y de parámetros como la difusividad (Ochoa & Ayala, 2005). Generalmente, cuando se quiere utilizar un modelo fenomenológico para procesos de DO a presión atmosférica, se emplea el modelo de Crank, que consiste en una solución de la segunda ley de Fick y representa el mecanismo difusional no estacionario (Crank, 1975), el cual se explica a continuación, y es el que se empleó en este trabajo experimental.

3.3. Solución de Crank

Consiste en un grupo de soluciones de la segunda ley de difusión de Fick para diferentes geometrías, condiciones límite y condiciones iniciales desarrolladas por Crank. Este modelo ha sido empleado por muchos autores ya que es el modelo fenomenológico más conocido para representar el mecanismo difusional (Giraldo, 2003; Park, 2002; Rodríguez, 2003; Azuara, 2002). Con el modelo de Crank, se estima la difusividad efectiva (D_e) del agua y del soluto, simulando los experimentos con condiciones límite y resolviendo las ecuaciones analítica o numéricamente, pero las suposiciones que se hacen no siempre son fáciles de lograr, lo que implica grandes limitaciones (Parjoko, 1996). Las limitaciones del modelo de difusión de Fick para propósitos prácticos son:

1. Se asume un cuerpo semi-infinito, por lo tanto la transferencia de masa es unidireccional.
2. Se asume que el agente osmótico es un medio semi-infinito, por lo tanto se requiere una relación disolución/alimento muy grande.
3. Aunque tiene en cuenta la forma y las dimensiones del alimento, sólo hay soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas, por lo que se requieren técnicas numéricas para materiales irregulares.
4. El punto de equilibrio tiene que determinarse experimentalmente.
5. No hay efecto de los sólidos ganados ni de los solutos perdidos sobre la pérdida de agua.
6. Se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa.
7. Se desprecia la resistencia externa a la transferencia de masa. Sin embargo, esto no se puede lograr experimentalmente a baja temperatura ni para una alta concentración de soluto (Parjoko, 1996).

Por lo tanto, el uso de la solución de Crank se convierte en un procedimiento empírico para ajustar a los datos experimentales y la difusividad efectiva en un parámetro cinético fuertemente dependiente de las condiciones experimentales y del método matemático (Shi, 2002a).

3.4. Aplicaciones

La principal aplicación del proceso de DO es como pretratamiento a otros procesos de conservación de materiales biológicos, con el propósito de mejorar la calidad de los productos terminados, reducir el tiempo de proceso y ahorrar energía. Además tiene otras aplicaciones en la producción de materia prima para ser incorporada como ingrediente en productos de frutas, tales como jaleas, mermeladas, helados, lácteos y confitados, por lo que le abre una excelente posibilidad al aprovechamiento y exportación de frutas (Falade & Igbeka, 2007). También debido al fenómeno de inclusión de solutos al alimento, la DO se presenta como un método alternativo de formulación de nuevos productos, ya que permite modificar la composición del producto y, como consecuencia, mejorar sus propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales. Por ejemplo, al impregnarse azúcares en la fruta tratada con DO, se protege la pigmentación de los vegetales, por lo que su aplicación podría eliminar la necesidad de inactivar enzimas (Genina, 2002). La DO es un método de conservación de alimentos factible de adaptarse en países con economías emergentes, que produzcan frutas tropicales, las cuales normalmente se consumen frescas por ser productos perecederos, y que al someterse a tratamientos de procesado mínimo puedan conservarse y exportarse, manteniendo muchas de sus propiedades organolépticas y nutricionales (Genina, 2002).

3.5. Ventajas

Algunas ventajas de la deshidratación osmótica son:

- Lograr un producto de mejor color, textura y sabor que por medio del secado térmico (Azua, 2002; Saputra, 2001; Parjoko, 1996).
- Inhibir la transferencia de oxígeno a la fruta por la presencia de azúcar sobre la superficie, reduciendo el pardeamiento enzimático (Saputra, 2001).
- Aumentar la vida útil de los productos ya que se reduce la difusividad del agua en el proceso de sorción (Saputra, 2001).
- Retardar la pérdida de compuestos volátiles durante el secado térmico (Azua, 2002).
- La DO requiere menor energía que otros tipos de secado, ya que la eliminación de agua se hace sin cambio de fase (Sablani & Rahman, 2003; Madamba & López, 2002).
- Debido a que la velocidad de secado térmico se reduce con muestras previamente sometidas a DO dada la reducción del coeficiente de difusión por la impregnación de azúcar, el consumo de energía por kilogramo de agua eliminada aumenta. Sin embargo, los costos globales de energía son menores ya que hay menos agua para eliminar (Grabowski, 2002).

- Se ha comprobado que efectuando un tratamiento de DO previo al proceso de secado térmico, se reduce el daño de las propiedades de textura, estructurales y sensoriales del alimento (Kawamura, 1988) y se disminuyen los costos energéticos (Ochoa & Ayala, 2005).
- Es posible introducir solutos tales como agentes conservantes, nutrientes, saborizantes o mejoradores de textura como componentes activos a través de la disolución osmótica (Sablani & Rahman, 2003).

3.6. Desventajas

A pesar de sus ventajas, la DO aún tiene restricciones para su implementación a nivel industrial, tanto en el diseño de los equipos como de los procesos (Ochoa & Ayala, 2005). Estas restricciones están relacionadas principalmente con la falta de modelos predictivos de cinéticas de pérdida de humedad y ganancia de sólidos, que permitan relacionar con precisión las características de los productos deshidratados con las de la materia prima y las variables del proceso. Las limitaciones en la modelación de la DO se deben principalmente a la presencia de un mecanismo complejo de transferencia de masa simultánea de dos flujos en contracorriente en un sistema que es polifásico y multi-componente (Barat, 1998). Otra desventaja es que el proceso osmótico es relativamente lento, en comparación con el proceso de secado convencional (Rastogi & Raghavarao 2002; Giraldo, 2003).

CAPITULO IV

ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Actualmente existen diversos métodos y tecnologías de conservación “no térmicos”, con los cuales se pueden obtener alimentos mínimamente procesados, como por ejemplo:

- Altas presiones hidrostáticas (APH)
- Ultrasonido
- Irradiación
- Pulsos de campos eléctricos de alta intensidad
- Campos magnéticos oscilantes
- Luz blanca de alta intensidad (Herrero, 2006)

La presión hidrostática se refiere a la presión que experimenta un cuerpo cuando es sumergido en un líquido en función de la densidad del mismo, la fuerza de gravedad y la profundidad a la cual se sumerge. El tratamiento por altas presiones es un proceso físico no térmico, que consiste en someter al alimento a una elevada presión (100-1000 MPa). El fluido transmisor de la presión suele ser agua, de ahí el nombre de alta presión hidrostática (APH) (Cheftel, 1995). También suele denominarse como pascalización, presurización o simplemente alta presión (Daoudi, 2004; Knorr 1993).

Existen dos procedimientos de APH: La presión dinámica, todavía no utilizada a nivel industrial, y la presión estática, que es la que hoy tiene aplicación práctica (Herrero, 2006). En la alta presión dinámica, el incremento de presión se origina en un tiempo muy corto de milésimas de segundo como consecuencia de una explosión que genera una onda de choque (> 100 MPa), denominada onda de choque hidrodinámica. Este procedimiento (Hydrodyne Process, HDP) se encuentra en fase de estudio y desarrollo. La aplicación de alta presión estática se basa en someter a un producto a elevados niveles de presión hidrostática que van de 100 a 1000 MPa de forma continua durante un cierto tiempo de varios minutos. En la Figura 8 se muestra un diagrama comparativo de presiones aplicadas. A este tipo de tecnología se le denomina comúnmente altas presiones hidrostáticas (High Pressure Processing, HPP) (Knorr, 2000), este procedimiento fue el que se utilizó en este trabajo.

La utilización de altas presiones hidrostáticas se rige, fundamentalmente, por dos principios.

- a) Principio de Le Chatelier, el cual establece que cuando una fuerza o perturbación es ejercida sobre un sistema, este reaccionará para contrarrestar dicha fuerza (Heremans, 1995). Según este principio, la aplicación de la alta presión desplaza el equilibrio de un proceso hacia el estado que ocupa menos volumen (Cheftel, 1991).

b) Ley de Pascal, según la cual una presión externa aplicada a un fluido confinado se transmite de forma homogénea e instantánea en todas las direcciones, independientemente del tamaño y de la geometría del medio (Barbosa-Cánovas, 1998).

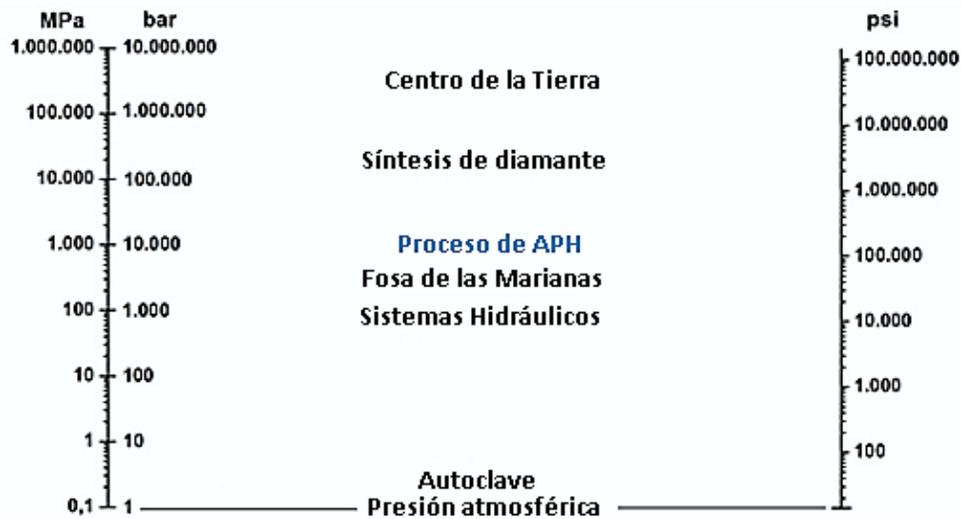


Figura 8. Niveles de presión de diferentes sistemas (Tecnología HPP Hiperbaric, 2012).

De acuerdo con este último principio, esta tecnología puede aplicarse directamente a alimentos líquidos o a cualquier producto envasado sumergido en un fluido de presurización de baja compresibilidad. La presión aplicada al sistema permitiría un tratamiento isostático y uniforme independientemente del tamaño, forma y volumen del material procesado. Por ello no existe presencia de zonas sobretratadas y evita la deformación del producto. Cuando los alimentos se tratan en su envase, este debe ser flexible y deformable que permita reducciones de volumen de hasta 15 %. Es especialmente importante la evacuación de los gases del interior para evitar que su compresión reduzca la eficacia de la presurización, por lo que se recomienda el uso de envasado al vacío (Herrero, 2006; Daoudi, 2004).

4.1. Equipos

Los equipos de alta presión hidrostática empleados en el procesamiento de alimentos están formados fundamentalmente por:

1. Una cámara de presurización cilíndrica de acero de elevada resistencia.
2. Un generador de presión, generalmente un sistema de bombeo constituido por una bomba hidráulica y un sistema multiplicador de presión.

3. Un sistema de control de temperatura.

En la actualidad existen equipos de funcionamiento semicontinuo y discontinuo, siendo los segundos los más utilizados.

4.1.1. Equipos de funcionamiento semicontinuo

La presión se comunica al producto de manera directa a través de un pistón móvil. Una vez presurizado el producto se envasa asépticamente. Pueden utilizarse para tratar productos líquidos no envasados.

4.1.2. Equipos de funcionamiento discontinuo

Los alimentos envasados, líquidos o sólidos, se colocan en el interior de la cámara de presurización. El sistema de bombeo sustituye gradualmente el aire de la cámara por el fluido de presurización hasta su total llenado y, posteriormente, incrementa la presión hasta los niveles establecidos. Una vez alcanzada la presión deseada, una válvula cierra el circuito permitiendo su mantenimiento, sin necesidad de aporte adicional de energía, durante el tiempo estipulado (Téllez, 2001; Herrero, 2006). Este tipo de funcionamiento fue el empleado en el equipo de APH, para el tratamiento de las placas de fruta deshidratadas osmóticamente en este trabajo.

4.2. Proceso de presurización

El alimento se coloca en un recipiente de plástico estéril, se sella y se introduce en la cámara de presurización para su procesamiento. Se recomienda que el material plástico sea una película de alcohol de polivinilo (PVOH) o películas copoliméricas de alcohol de etileno y vinilo (EVOH). La cámara de presurización se cierra y se llena con el medio transmisor de la presión, normalmente agua. La presión aplicada comprime el medio transmisor alrededor del alimento provocando una disminución del volumen que varía según la presión y la temperatura aplicadas. Al finalizar el tiempo, la cámara se descomprime y se extrae el alimento tratado (Barbosa-Cánovas, 1998).

4.3. Efecto de la alta presión sobre los constituyentes de los alimentos

4.3.1. Agua

El volumen del agua disminuye un 4 % a 100 MPa y un 15 % a 600 MPa a una temperatura de 22 °C (Cheftel, 1991). Los alimentos con alta humedad y poco gas reaccionan a una compresión similar a la del agua. Esta disminución de volumen implica un aumento de la densidad y, como consecuencia, los coeficientes de difusión de los solutos disminuyen (Daoudi, 2004). La compresión adiabática del agua causa un aumento de 2 a 3 °C por cada 100 MPa, que depende de la temperatura inicial del agua y de la velocidad de compresión. Este cambio es reversible cuando se realiza la descompresión ya que se produce una disminución de la temperatura de la misma magnitud, así como un aumento en los coeficientes de difusión de los solutos (Cheftel & Culliolli, 1997).

4.3.2. Lípidos

La temperatura de fusión de los lípidos, en especial de los triglicéridos, aumenta con la presión de manera reversible en más de 10 °C por cada 100 MPa. Por este motivo, los lípidos en estado líquido a temperatura ambiente pueden cristalizar bajo presión. Esto puede explicar algunas de las causas de destrucción de los microorganismos por la presión debido a los cambios cristalinos en los fosfolípidos de la membrana celular (Cheftel, 1995). El aumento de la presión puede producir un aumento de la oxidación de los lípidos insaturados del alimento, relacionado con la desnaturalización de las proteínas causada por la presión, quedando iones metálicos libres que catalizarían la oxidación lipídica (Beltrán, 2003).

4.3.3. Hidratos de carbono

Los azúcares simples no resultan afectados por este tratamiento (Cheftel, 1992). Las reacciones de condensación de Maillard son inhibidas por la aplicación de presiones entre 50 y 200 MPa (Sangronis, 1997). En consecuencia el desarrollo del sabor y del color, típicos de esta reacción, no se produce. La alta presión afecta la transición sol-gel de los polisacáridos, formándose geles diferentes a los obtenidos por aplicación de calor. En cuanto a los granos de almidón, estos gelatinizan bajo presión a temperaturas más bajas de las habituales (Gekko, 1992).

4.3.4. *Proteínas*

La aplicación de presiones superiores a 100 MPa a temperatura ambiente, provoca la disociación de macroestructuras en subunidades, así como el despliegue y desnaturalización de estructuras monoméricas, probablemente debido al debilitamiento de las interacciones hidrofóbicas. En general, los efectos que sufren las estructuras terciaria y cuaternaria de las proteínas pueden ser reversibles aunque, dependiendo de factores como la temperatura, pH y otros, pueden tener lugar de forma irreversible (Heremans, 1995; Cheftel, 1995).

4.3.5. *Enzimas*

La función enzimática puede verse afectada de diversas maneras. La inactivación puede ser parcial o total, reversible o irreversible dependiendo del tipo de enzima, del nivel de presión, del tiempo, de la temperatura o del pH del medio. Se ha sugerido que la eficiencia de la alta presión en la inactivación de enzimas se puede incrementar mediante la aplicación de ciclos de presión, produciendo una mayor inactivación enzimática y una menor actividad residual que la obtenida después de la aplicación de un proceso de presión continuo durante el mismo tiempo total de tratamiento. Las enzimas pectinmetilesterasa, la polifenoloxidasa y la peroxidasa son muy resistentes a la presión y las podemos encontrar frecuentemente en los vegetales y frutas (Cheftel, 1995, Daoudi, 2004).

4.3.6. *Vitaminas*

Las altas presiones hidrostáticas es el proceso tecnológico que menos afecta a las vitaminas hidrosolubles, lo que contribuye a conservar la calidad nutricional del producto (Daoudi, 2004).

4.4. **Ventajas**

Las altas presiones hidrostáticas presentan las siguientes ventajas:

- El tratamiento con APH evita la deformación de los alimentos, debido a que la presión se transmite uniforme e instantáneamente.
- El tratamiento de APH es independiente del volumen y de la forma de la muestra, con lo que se reduce el tiempo requerido para procesar grandes cantidades de alimento (Cheftel, 1995; Pothakamury, 1995).

- No produce deterioro de nutrientes termolábiles como por ejemplo vitaminas, ni altera otros compuestos de bajo peso molecular, fundamentalmente aquellos responsables del aroma y el sabor (Kimura, 1994).
- No se altera el sabor natural, ni la coloración del alimento, pues las altas presiones no favorecen la reacción de Maillard o de pardeamiento no enzimático (Hayashi, 1989).
- No produce residuos
- No requiere la incorporación de aditivos al alimento.
- Tiene poco gasto energético. Por ejemplo, para calentar 1 litro de agua a 30 °C se necesita la misma energía que para presurizar a 400 MPa ese mismo volumen de agua (Téllez, 2001).

4.5. Desventajas

El proceso de altas presiones hidrostáticas presenta las siguientes desventajas:

- El equipo de APH es de alto costo, sin embargo, se ahorra energía debido al bajo consumo energético de esta técnica, por lo que a largo plazo se recupera la inversión.
- Con los equipos de APH disponibles hasta ahora en el mercado no se pueden diseñar procesos continuos.
- Existe cierta desconfianza del consumidor al decidirse a comprar un producto “presurizado”, por ser algo novedoso y desconocido (Téllez, 2001).

4.6. Aplicaciones de las APH en la industria alimentaria

Las altas presiones hidrostáticas, por todas sus ventajas y características, cuentan con aplicaciones de muy diversa índole en la industria alimentaria, la mayoría de ellas van orientadas a la conservación de alimentos (Téllez, 2001), como se muestra a continuación:

- Pasteurización y eliminación de microorganismos patógenos sin modificar el valor nutritivo ni las propiedades organolépticas de los alimentos.
- Inactivación/activación de enzimas para retardar/acelerar procesos de maduración, fermentación u otro tipo de transformaciones enzimáticas deseables en los alimentos.
- Modificación de la estructura debido a cambios en la configuración proteínica. Ablandamiento de textura en carnes y pescados, decoloración de hemoglobina en sangre de animales, inactivación de ciertas toxinas como la patulina, una toxina producida por algunas especies de *Aspergillus*, *Penicillium*, y *Bysochlamys*.
- Cambios en las transiciones de fase, i.e. congelación a temperaturas bajo cero, evitando la formación de cristales de hielo, disminución del punto de fusión de lípidos, gelatinización a bajas

temperaturas, produciendo geles con otras características a las obtenidas en geles sometidos al calor, como en el caso de geles con leche o surimi (San Martín, 2002).

- Extracción de componentes alimentarios como pectinas, pigmentos e incluso agua.
- Agregación de sólidos o polvos alimentarios para elaborarlos en forma de barras, cubos, tabletas (Téllez, 2001).

En el mercado pueden encontrarse productos presurizados como mermeladas, comercializadas a partir de 1990 en Japón, jugos, jaleas, concentrados, purés de frutas, postres, en países como Japón, EUA, Alemania, patés, por ejemplo en Francia, productos lácteos en Reino Unido, derivados cárnicos como curados, cocidos y preparados listos para su consumo en España. Asimismo, esta tecnología acelera la difusión de solutos, la disolución de gases y los procesos de extracción en diversos alimentos (Herrero, 2006). El efecto de las altas presiones hidrostáticas puede resumirse en los siguientes puntos:

a) Afectación en la viabilidad de los microorganismos debido a los siguientes efectos:

- Disminución de la síntesis de ADN.
- Aumento de la permeabilidad de las membranas celulares.
- Desnaturalización de biopolímeros y proteínas, incluida la inactivación de enzimas, por cambios en la estructura intramolecular (> 300 MPa).

b) Efectos en los componentes y las características de los alimentos:

- No se afectan los enlaces covalentes.
- No se alteran los aromas ni el valor nutritivo de los alimentos.
- Se pueden producir cambios de color y de apariencia.
- Cambios en la morfología de la célula, los cuales son reversibles a bajas presiones (< 200 MPa), pero son irreversibles a altas presiones (> 300 MPa).
- Modificaciones en los atributos de textura, aunque los efectos varían de unos alimentos a otros (Knorr, 2000; Smelt, 1998).

4.7. Efecto combinado entre la deshidratación osmótica y la APH

Debido a la baja tasa de transferencia de masa observada durante la deshidratación osmótica, diversas técnicas han tratado de mejorarla. Algunas de ellas incluyen: Someter el material alimenticio a vacío parcial (Rastogi & Raghavarao, 1996), a fuerza centrífuga durante el tratamiento osmótico (Azuares & Beristain, 1996), a un tratamiento previo con altas presiones hidrostáticas (Rastogi & Niranjana, 1998), o con pulsos de campo eléctrico de alta intensidad (Simal & Benedito, 1999). La

aplicación de las altas presiones hidrostáticas daña la estructura de la pared celular del alimento, debido a la compresión y descompresión que tiene lugar durante este pretratamiento, dejando las células más permeables, lo que conduce a cambios significativos en la arquitectura del tejido celular, que resulta en un aumento de las tasas de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica en comparación con las muestras no tratadas. Además, el tratamiento previo con APH aumenta la eliminación de agua y ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica hasta el equilibrio en el que los fenómenos de transporte neto son insignificantes (Rastogi & Raghavarao 2002; Núñez, 2013). Sin embargo, los datos reportados en la literatura varían, debido a las diferentes combinaciones de presión-tiempo-temperatura, condiciones de secado, y también la variedad de las frutas y verduras seleccionadas (Yucel, 2010).

CAPITULO V

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo experimental se realizó en dos etapas. La primera consistió en someter placas de dos frutas diferentes, papaya variedad maradol y manzana variedad Chihuahua, a deshidratación osmótica sin tratamiento previo, variando la temperatura de la disolución hipertónica. La segunda etapa consistió en someter placas de estas mismas frutas a altas presiones hidrostáticas (APH) como tratamiento previo a la deshidratación osmótica, tomando como variables la presión aplicada así como la temperatura de la disolución hipertónica en la deshidratación osmótica.

5.1. Materia prima

Se escogieron dos variedades de fruta para deshidratar en forma de placas, las cuales se enlistan a continuación.

5.1.1. *Manzana (Malus domestica) variedad Chihuahua*

La manzana y la papaya se compraron en el mercado "Ajusco Monserrat". Se seleccionó fruta que no presentara daños físicos. En cada tratamiento por duplicado se utilizó un lote de 1 kg de fruta, la cual fue almacenada a temperatura ambiente en una bolsa de plástico hasta su posterior utilización. Todas las manzanas utilizadas fueron lavadas y peladas. Para cada réplica, con ayuda de un Vernier, se cortaron y midieron 13 placas con un espesor de 8 mm. Cada placa de fruta se pesó en una balanza (Adventurer Ohaus, EUA) hasta que todas presentaron una masa de 5.0 g. Las placas de manzana fueron almacenadas en un recipiente de plástico con tapa para evitar lo más posible su oxidación y pérdida de agua. Las placas de manzana no fueron sometidas a algún tratamiento químico para retardar la oxidación.

5.1.2. *Papaya (Carica papaya L.) variedad maradol*

La papaya maradol se seleccionó con base en su madurez y ausencia de magulladuras. Se utilizó una papaya en cada tratamiento por duplicado. La fruta, una vez comprada, se almacenó a temperatura ambiente hasta su utilización. La fruta se lavó perfectamente y se peló con ayuda de un cuchillo. Posteriormente, para cada réplica se cortaron 13 placas con un espesor de 8 mm y un peso de 5 ± 0.1 g, el cual se midió en una balanza de 1500 ± 0.01 g (Adventurer Ohaus, EUA). Las placas

se almacenaron en un recipiente de plástico con tapa para evitar la pérdida de agua al ambiente. En el proceso de deshidratación osmótica se preparó una disolución hipertónica con 60 % de sacarosa descrita a continuación.

5.2. Disolución hipertónica

Se utilizó azúcar refinada grado comercial, y agua desionizada para la preparación de una disolución con 60 g de sacarosa/100 g (60%). En cada réplica se colocó una relación de 1:10, es decir, una parte de muestra por cada 10 de disolución hipertónica para mantener la masa constante de la disolución a lo largo de todo el proceso.

5.3. Diagramas de trabajo experimental

En las Figuras 9 y 10 se resumen los diagramas de trabajo experimental llevados a cabo.

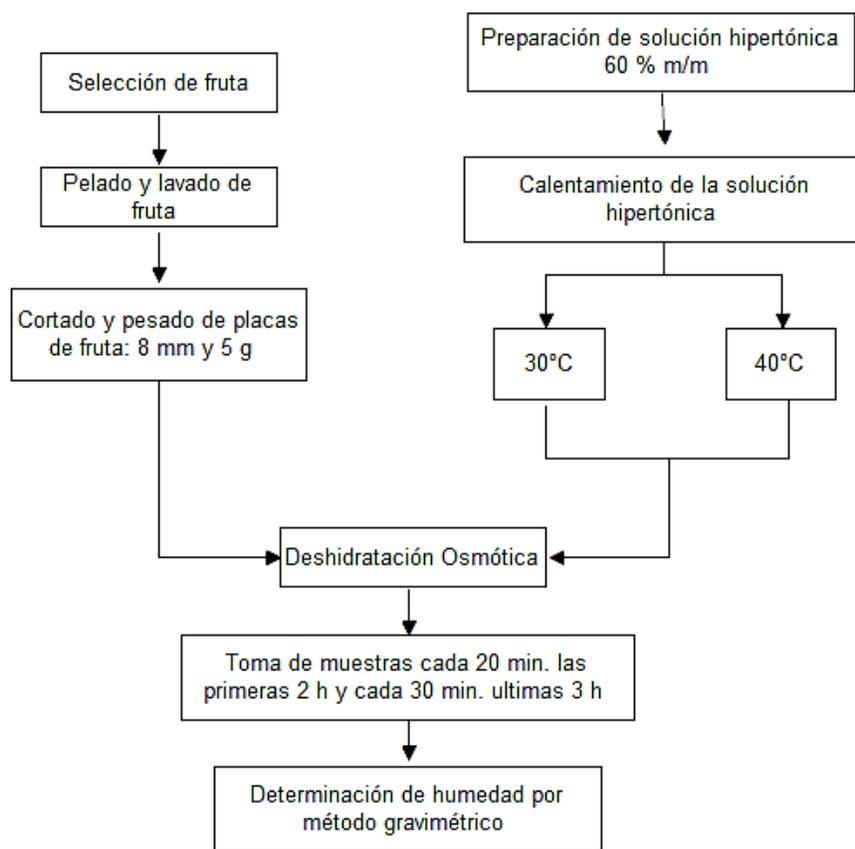


Figura 9. Diagrama de trabajo experimental de la deshidratación osmótica de placas de fruta sin tratamiento previo con APH.

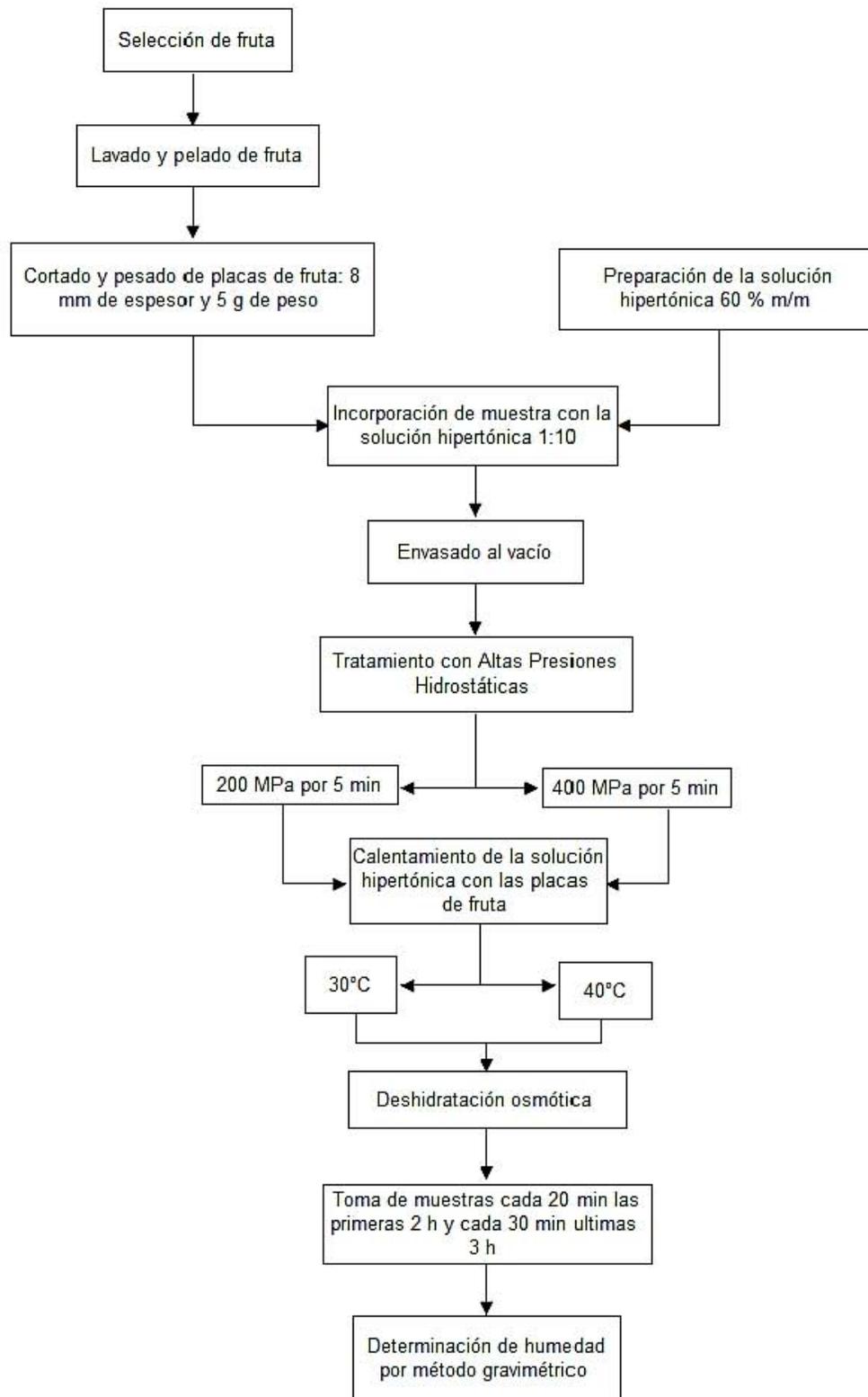


Figura 10. Diagrama de trabajo experimental de la deshidratación osmótica de placas de fruta con tratamiento previo con APH.

5.4. Procesamiento con altas presiones hidrostáticas

Se llevaron a cabo diversos tratamientos con dos réplicas cada uno, presentados en la Tabla 5, variando la temperatura de la disolución hipertónica así como la presión aplicada a las placas de fruta que fueron sometidas a APH.

Tabla 5. Tratamientos de placas de manzana y papaya.

Tratamiento	P (MPa)	Temperatura de la disolución hipertónica (°C)
A	Atmosférica*	30
B	Atmosférica*	40
C	200	30
D	200	40
E	400	30
F	400	40

*Sin tratamiento previo con APH.

Las placas de fruta que fueron sometidas a un tratamiento con APH se colocaron junto con la disolución hipertónica con 60 % de sacarosa, en una relación 1:10, dentro de bolsas de polietileno termoselladas formadas a partir de un rollo para envasado al vacío FoodSaver®. Las dimensiones de cada bolsa fueron 28 x 14.5 cm. Debido a que la cámara del equipo de APH tiene una capacidad nominal de 500 mL, las placas de fruta tuvieron que tratarse en lotes pequeños. Cada réplica, conformada por 13 placas de fruta, se distribuyó en cuatro bolsas de la siguiente forma: En tres bolsas se colocaron tres placas de fruta y en una cuarta bolsa se colocaron cuatro placas de fruta. Cada bolsa fue sellada al vacío con el propósito de quitar el mayor aire posible, ya que de no ser así podría haber una variación en la presión entre cada lote y disminuir la eficiencia del tratamiento. Una vez selladas todas las bolsas con las placas de fruta y disolución hipertónica, se introdujeron una por una en el equipo de altas presiones hidrostáticas (Elmhurst Systems LLC, EUA). El tratamiento con altas presiones hidrostáticas consistió en someter las placas de fruta a las presiones mencionadas en la Tabla 5, durante cinco minutos cada lote, utilizando agua como medio de presurización. Una vez tratadas las 13 placas de un lote, fueron vaciadas junto con la disolución hipertónica en un vaso de precipitados en donde se continuó con el proceso de deshidratación osmótica.

5.5. Deshidratación osmótica

Una vez colocadas todas las placas de fruta en la disolución hipertónica de sacarosa en un vaso de precipitados de 500 mL, con ayuda de una parrilla eléctrica (Barnstead-Thermolyne SUPER-NUOVA, modelo SP131825, Malasia), se elevó la temperatura de la disolución de acuerdo con cada tratamiento. En el momento en el que la disolución alcanzó la temperatura adecuada se comenzó a tomar el tiempo para el proceso de deshidratación osmótica, manteniendo dicha temperatura constante. El tiempo de deshidratación osmótica para todos los tratamientos fue de cinco horas, con el objetivo de llegar a una humedad en equilibrio y en consecuencia obtener el coeficiente de difusividad. A lo largo de este proceso se fue sacando una placa cada veinte minutos en las dos primeras horas del proceso y cada treinta minutos en las siguientes tres. Cada muestra se lavó con agua desionizada para quitar el azúcar adherida en la superficie, y se secó el exceso de agua con papel adsorbente, posteriormente se colocó en un recipiente de plástico con tapa, para su posterior determinación de humedad.

5.6. Determinaciones

5.6.1. Sólidos solubles

Para medir los sólidos solubles presentes, azúcares, vitaminas, ácidos, aminoácidos y algunas pectinas, en la disolución hipertónica de sacarosa, se usó un refractómetro (ATAGO HSR-500, Japón) con intervalo de 0 a 90 °Bx. Esta medición se realizó a lo largo de todo el proceso de DO a la temperatura a la que se estaba deshidratando las placas (30 o 40 °C) dependiendo del tratamiento, para verificar que la disolución hipertónica mantuviera una concentración de sacarosa de 60 °Bx.

5.6.2. Humedad

La humedad se determinó con base en el método gravimétrico oficial para la “Determinación de humedad en alimentos” (AOAC, 2005), en estufa de vacío (Barnstead-Lab line, modelo 3608, EUA) a 75°C y 40 kPa por 18 h. Se determinó el peso inicial de cada placa de fruta pesándolo en una balanza analítica (Adventurer Ohaus, USA). Una vez terminado este tiempo, las muestras se sacaron de la estufa de vacío y se colocaron en un desecador de vidrio con sílica gel, posteriormente, fueron pesadas y por diferencia de pesos se determinó su porcentaje de humedad.

5.7. Mediciones durante la deshidratación osmótica

A lo largo del tiempo del proceso de DO, la transferencia de masa fue seguida por los siguientes parámetros:

- Contenido de humedad (%)
- Contenido de sólidos secos (%)
- Pérdida de agua (g de agua/g sólidos secos)
- Ganancia de sólidos (g sólidos secos/g sólidos secos iniciales)

Estos parámetros fueron calculados por duplicado, con las ecuaciones que se describen a continuación (Penagiotou, 1999; Falade & Igbeka, 2007):

5.7.1. Humedad

$$H = \frac{(M - m)}{M} \times 100 \quad (1)$$

m = masa seca instantánea de fruta (g ss)

M = masa instantánea de fruta fresca (g fruta)

H = Contenido de humedad (%)

5.7.2. Sólidos secos

$$S_s = 100 - H \quad (2)$$

H = Contenido de humedad (%)

S_s = sólidos secos (%)

5.7.3. Pérdida de agua

$$W_L = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{m_0} \quad (3)$$

m₀ = masa seca inicial de fruta (g ss)

M₀ = masa inicial de fruta fresca (g fruta)

W_L = pérdida de agua (g agua/g ss)

5.7.4. Ganancia de sólidos

$$S_G = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (4)$$

S_G = Ganancia de sólidos (g ss /g ss iniciales)

Las ecuaciones 3 y 4 se usan cuando se toma como base la masa de sólidos secos que hay inicialmente en la fruta fresca.

5.8. Cinética de deshidratación osmótica. Modelo de Peleg

La ecuación de Peleg se ha usado para analizar la deshidratación osmótica como un fenómeno que alcanza el equilibrio. Las curvas de deshidratación se establecieron usando el modelo de Peleg, ya que con estas se puede entender la cinética de la transferencia de masa en la DO. Este modelo de dos parámetros se ha usado ampliamente para describir las curvas de deshidratación osmótica (Azoubel & Murr, 2004; Park, 2002) ya que presenta el mejor ajuste para los datos experimentales. En este caso la ecuación de Peleg se expresa en términos del cambio de W_L o S_G . En la ecuación 5, k_1 representa la constante de velocidad y k_2 la constante de capacidad (Khoyi & Hesari, 2007).

$$C = C_0 \pm \frac{t}{k_1 - k_2 t} \quad (5)$$

C = contenido instantáneo de agua o de sólidos secos (g)

C_0 = contenido inicial de agua o de sólidos secos (g)

k_1 = constante (s·g/g)

k_2 = constante (g/g)

t = tiempo (s)

En la ecuación 5, k_1 , se relaciona con la velocidad de desorción al inicio del proceso, mientras que k_2 , se relaciona con la humedad de equilibrio cuando el tiempo tiende a infinito. El significado físico para ambos parámetros del modelo se puede obtener haciendo que $t \rightarrow 0$ en la ecuación 5 y reordenando se obtiene

$$\frac{1}{k_1} = \frac{dC}{dt}_{t \rightarrow 0} \quad (6)$$

Podemos decir que k_1 es inversamente proporcional a la velocidad inicial de transferencia de masa. Por otra parte, si $t \rightarrow \infty$, podemos encontrar la relación del parámetro k_2 con la humedad de equilibrio

$$H_e = H_0 + \frac{1}{k_2} \quad (7)$$

H_e = humedad de equilibrio

La ecuación 5 puede transformarse algebraicamente para adoptar la forma $y = mx + b$. Al hacerlo, es posible determinar las constantes. Existen dos formas posibles, una de ellas es:

$$\frac{1}{C - C_0} = \frac{k_1}{t} + k_2 \quad (5a)$$

En este caso, una gráfica $1/(C - C_0)$ vs $1/t$ producirá una recta con pendiente k_1 y ordenada al origen k_2 . La otra forma es como se expresa en la ecuación 5b

$$\frac{t}{C - C_0} = k_1 + k_2 t \quad (5b)$$

En esta caso, una gráfica $t/(C - C_0)$ vs t producirá una recta con pendiente k_2 y ordenada al origen k_1 . Esta última forma parece ser preferible, dado que no hay que calcular el inverso del tiempo, por lo que para este trabajo se trazaron dichas gráficas para todos los tratamientos de cada fruta. La ecuación 5 puede servir entonces para predecir la pérdida de agua y la ganancia de sólidos para cualquier tiempo durante la deshidratación osmótica. Las constantes obtenidas en la ecuación 5b, fueron sustituidas en la ecuación 5 para obtener W_L y S_G . Posteriormente, se incluyeron en una sola gráfica tanto el contenido de W_L o S_G experimental, como el contenido de W_L o S_G calculado, a lo largo de las cinco horas que duró la DO.

Después de trazar las curvas de deshidratación osmótica como una función del tiempo para W_L y S_G , se calculó el error relativo promedio para cada grupo de datos, el cual fue calculado con la ecuación 8 (Khoiyi & Hesari, 2007).

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_E - V_P}{V_E} \right| \quad (8)$$

E = error relativo promedio (adimensional)

n = número de datos experimentales

V_E = valor experimental (agua perdida o ganancia de sólidos)

V_P = valor calculado (agua perdida o ganancia de sólidos)

5.9. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica

Debido a que existe una transferencia de masa por difusión en la deshidratación osmótica, se puede aplicar la segunda ley de Fick para calcular el coeficiente de difusión efectiva. La difusión corresponde al movimiento microscópico de átomos y moléculas. Esto se presenta en todos los estados de agregación de la materia. En sólidos, la difusión es el principal mecanismo de

transferencia de masa. El coeficiente de difusión es una medida de la rapidez con la que se difunde un producto en ese medio y su unidad de medida es m^2/s (Yunus, 2006).

5.9.1. Coeficientes de difusividad efectiva de agua y solutos

La solución de Crank es un grupo de soluciones de la segunda ley de difusión de Fick que modela el mecanismo difusional, cuya ecuación general (ecuación 9) describe la transferencia de masa en estado no estacionario, unidimensional, en material sólido (Crank, 1975).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (9)$$

Con la solución de Crank se puede estimar la difusividad efectiva (D_e) del agua y del soluto, simulando los experimentos con condiciones límite y resolviendo las ecuaciones analítica o numéricamente con base en las diferentes geometrías del cuerpo a estudiar y de las condiciones iniciales en el proceso de deshidratación osmótica (Crank, 1975; Barat, 1998; y Rastogi & Raghavarao, 2002). En este caso, para analizar la cinética del proceso como un fenómeno difusivo, se empleó la solución del modelo para láminas semi-infinitas en tiempos largos, con un espesor de $2L$. Dicho modelo se expresa en la ecuación 10:

$$\frac{C - C_\infty}{C_0 - C_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_e t}{4L^2}\right] \quad (10)$$

C = concentración instantánea de componente (g/cm^3)

C_0 = concentración inicial de componente (g/cm^3)

C_∞ = concentración de equilibrio del componente (g/cm^3)

D_e = Difusividad másica efectiva (cm^2/s)

L = mitad del espesor de la placa $2L$ (cm)

t = tiempo (s)

Esta ecuación se resuelve considerando las siguientes condiciones iniciales y de frontera: concentración inicial homogénea, geometría del producto y concentración constante de la interfaz.

$C(x, 0) = C_0 \quad t = 0$ Condición inicial

$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$ Condición de simetría

$C(L, t) = C_\infty \quad x = L$ Condición de equilibrio en la superficie de la placa

La ecuación 10 puede escribirse en términos de la pérdida de agua o de la ganancia de sólidos como se representa en las ecuaciones 11 y 12, respectivamente:

$$\frac{W_L - W_{L\infty}}{W_{L0} - W_{L\infty}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_e t}{4L^2}\right] \quad (11)$$

W_L = pérdida de agua instantánea de la fruta (g agua/g sólido seco)

W_{L0} = pérdida de agua inicial de la fruta (g agua/g sólido seco)

$W_{L\infty}$ = pérdida de agua de equilibrio de la fruta (g agua/g sólido seco)

$$\frac{S_G - S_{G\infty}}{S_{G0} - S_{G\infty}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_e t}{4L^2}\right] \quad (12)$$

S_G = ganancia de sólidos instantánea de la fruta (g ss/g ss)

S_{G0} = ganancia de sólidos inicial de la fruta (g ss/g ss)

$S_{G\infty}$ = ganancia de sólidos en equilibrio de la fruta (g ss/g ss)

Para obtener la De para la pérdida de agua (W_L), se linealizó la ecuación aplicando el logaritmo natural a toda la expresión, quedando de la siguiente forma

$$\ln\left(\frac{W_L - W_{L\infty}}{W_{L0} - W_{L\infty}}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_e t}{4L^2}\right] - \ln\left(\frac{1}{(2n-1)}\right) \quad (13)$$

Si solo se toma el primer término de la sumatoria, $n = 1$, la ecuación queda

$$\ln\left(\frac{W_L - W_{L\infty}}{W_{L0} - W_{L\infty}}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left[\frac{\pi^2 D_e}{4L^2}\right] t \quad (14)$$

Al renombrar la pérdida de agua adimensional como Y queda expresado de la siguiente forma:

$$Y = \frac{W_L - W_{L\infty}}{W_{L0} - W_{L\infty}}$$

Sustituyendo Y, y simplificando en la ecuación 14 queda:

$$\ln Y = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left[\frac{\pi^2 D_e}{4L^2}\right] t \quad (14a)$$

La ecuación 14a es de la forma $y = mx + b$, ya que al graficar $\ln Y$ vs t , se pueden obtener los valores de la ordenada al origen y de la pendiente, donde b es un valor constante y m la pendiente de la recta.

$$m = -\left[\frac{\pi^2 D_e}{4L^2}\right] \quad b = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right)$$

Por lo tanto, a partir de la pendiente de la recta, se calcula D_e al despejar la difusividad efectiva quedando la siguiente expresión:

$$D_e = \frac{-4mL^2}{\pi^2} \quad (15)$$

Teniendo en cuenta que todos los datos deben estar expresados en las mismas unidades, la pendiente (m) expresada en términos de min^{-1} se convierte a s^{-1} y el espesor (L) de la placa medido en milímetros se debe expresar en metros, ya que la difusividad efectiva se encuentra en términos de m^2/s . Este mismo tratamiento se utilizó para la ecuación 12, en términos de ganancia de sólidos (S_G) de la siguiente manera, después de aplicar logaritmo natural a toda la expresión

$$\ln\left(\frac{S_G - S_{G\infty}}{S_{G0} - S_{G\infty}}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_e t}{4L^2} \right] - \ln\left(\frac{1}{(2n-1)}\right) \quad (16)$$

Posteriormente, tomando únicamente el primer término de la ecuación 16, donde $n = 1$, la ecuación se simplifica de la siguiente forma

$$\ln\left(\frac{S_G - S_{G\infty}}{S_{G0} - S_{G\infty}}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left[\frac{\pi^2 D_e}{4L^2} \right] t \quad (17)$$

Renombrando el término de ganancia de sólidos adimensional de la ecuación anterior como Y , queda

$$Y = \frac{S_G - S_{G\infty}}{S_{G0} - S_{G\infty}}$$

Al sustituir el término Y en la ecuación 17, se expresa

$$\ln Y_{SG} = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left[\frac{\pi^2 D_e}{4L^2} \right] t \quad (17a)$$

Al graficar esta dos rectas obtenidas de las ecuaciones 14a y 17a, y despejar D_e a partir de las pendientes, se obtuvo un valor de difusividad efectiva para W_L y otro para S_G ,

5.10. Índice de efectividad

El proceso de DO, se evaluó en términos de parámetros cinéticos, mediante el empleo del índice de efectividad (IE). Este parámetro se obtiene mediante el cociente entre la pérdida de agua y la ganancia de sólidos, expresado en la ecuación 18. Para este trabajo experimental se calculó el IE para los tiempos de osmodeshidratación de 20, 120 y 300 minutos

$$IE = \frac{W_L}{S_G} \quad (18)$$

El índice de efectividad es empleado para evaluar la efectividad del proceso de osmodeshidratación y es considerado como un parámetro de calidad. Es deseable maximizar la pérdida de humedad y minimizar el aumento de los sólidos. Valores altos de esta relación indican que el proceso osmótico es más efectivo, debido a que W_L es mayor que S_G , ya que hay una mayor pérdida de agua. Al contrario, valores bajos de IE, se asocian con un aumento de la difusión del soluto a la muestra con una mínima extracción de agua, lo cual es indeseable, tomando en cuenta el propósito del proceso de deshidratación (Ayala, 2010). En el presente trabajo, se evaluó la cinética de la deshidratación osmótica con base en el IE, en placas de papaya y manzana, para analizar la influencia de la presión aplicada y la temperatura de la disolución sobre la DO, por lo que se calculó el IE para tres tiempos distintos.

5.11. Parámetros cinéticos k_{WL} y k_{SG}

Algunas veces la deshidratación osmótica se ha analizado considerando la teoría de penetración de transferencia de masa. Con base en este análisis, la pérdida de agua y la ganancia de sólidos están dadas por las ecuaciones 19 y 20 (Silveira, 1996).

$$\frac{W_L}{W_{L\infty}} = k_{WL} t^{0.5} \quad (19)$$

$$\frac{S_G}{S_{G\infty}} = k_{SG} t^{0.5} \quad (20)$$

k_{WL} = constante de rapidez de pérdida de agua ($s^{-0.5}$)

k_{SG} = constante de rapidez de ganancia de sólidos ($s^{-0.5}$)

t = tiempo de ósmosis (s)

Estas ecuaciones son útiles cuando las constantes de rapidez pueden relacionarse con condiciones de operación como la temperatura y la concentración inicial de la disolución hipertónica. Hay que notar que las ecuaciones 19 y 20 tienen la forma $y = mx$, cuando se grafica el cociente de pérdida de

agua o de ganancia de sólidos vs la raíz cuadrada del tiempo de tratamiento osmótico. En este caso la pendiente proporciona directamente la constante de rapidez correspondiente. Otra forma de hacer el análisis consiste en graficar el logaritmo del cociente vs el tiempo; aquí la ordenada al origen es el logaritmo de la constante de rapidez y la pendiente es igual a 0.5. Si este no es el caso, entonces las ecuaciones 19 y 20 no describen el proceso (Silveira, 1996). Para este trabajo se trazaron dichas gráficas, con el fin de obtener el valor de las constantes de rapidez k_{SG} y k_{WL} y así relacionarlas con las diferentes temperaturas y presiones aplicadas en los tratamientos de deshidratación osmótica en las placas de fruta.

5.12. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos experimentales se utilizó el software Excel 2013. Este análisis se realizó a través de un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con interacción, con un nivel de confianza α : 0.05, seguido por un test de Tukey de comparaciones múltiples, con el objetivo de evaluar diferencias significativas entre los distintos tratamientos aplicados, para aquellos casos en donde resultó diferencia estadísticamente significativa. En este análisis estadístico, los factores que se evaluaron fueron la presión y la temperatura, determinando así si hubo un efecto significativo de estos factores, así como si existió una interacción entre ellos sobre la pérdida de humedad (W_L) o la ganancia de sólidos (S_G).

CAPITULO VI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Deshidratación osmótica en placas de fruta

6.1.1. Humedad

6.1.1.1. Humedad en manzana Chihuahua

En la Figura 11 se muestra la variación de la humedad durante la deshidratación osmótica de las placas de manzana Chihuahua para los diferentes tratamientos de temperatura y APH.

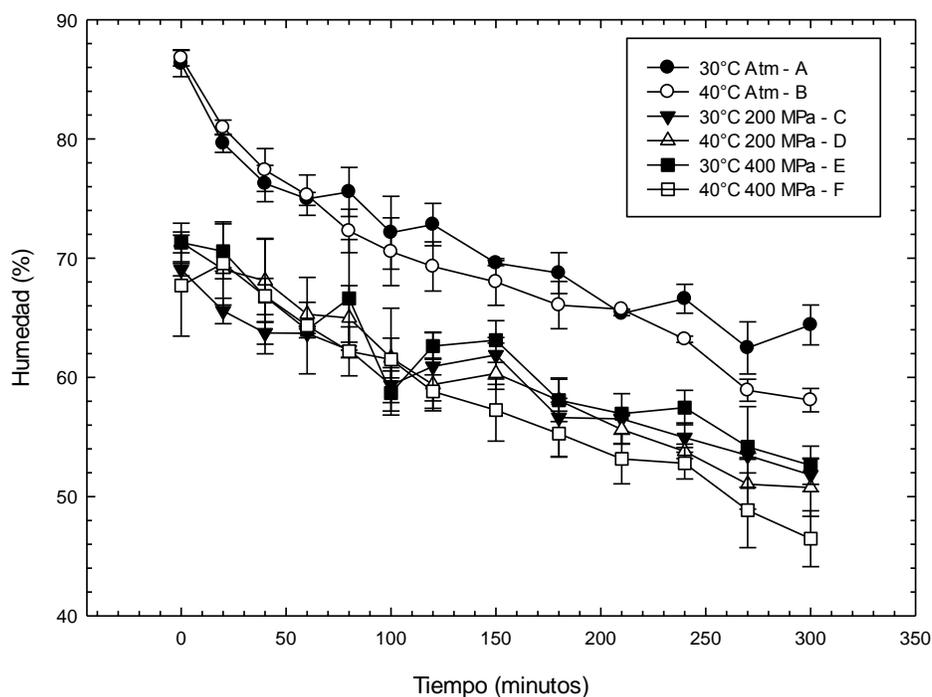


Figura 11. Variación de humedad (%) en placas de manzana Chihuahua deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y altas presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

La humedad disminuyó con el tiempo en todos los casos. Las muestras sometidas a APH presentaron una menor humedad inicial y final que aquellas sin presurización (Tabla 6). En los tratamientos deshidratados a 30 °C, las placas de fruta tratadas con APH (C y E) presentaron una considerable

disminución de humedad inicial y final, en comparación con el tratamiento A, pero no presentaron diferencia significativa entre ellos por efecto de la presión aplicada. Entre los tratamientos deshidratados osmóticamente a 40 °C, presentaron una menor humedad inicial y final los sometidos a APH, observando un efecto de la presión hidrostática sobre la humedad para los tratamientos D y F. El tratamiento F, tratado a 400 MPa, mostró una menor humedad inicial y final que D. Sin embargo, esta disminución de humedad inicial y final no es tan marcada en comparación con B que no fue sometido a APH.

Tabla 6. Indicadores de deshidratación osmótica iniciales y finales de los tratamientos de placas de manzana Chihuahua.

Tratamiento	Humedad (%)		Sólidos secos (%)		W_L (g agua/g ss)		S_G (g ss/g ss)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
A	86.32	64.40	13.68	35.60	0	3.47	0	0.58
B	86.80	58.09	13.20	41.91	0	4.37	0	0.59
C	69.03	51.82	30.97	48.18	0	0.89	0	0.24
D	71.32	50.75	28.68	49.25	0	0.78	0	0.25
E	71.31	52.63	28.69	47.37	0	0.73	0	0.25
F	67.69	46.47	32.31	53.53	0	1.27	0	0.12

El efecto de la temperatura se aprecia al analizar por separado aquellos tratamientos que fueron deshidratados osmóticamente a diferente temperatura y misma presión. Los tratamientos A y B, los cuales fueron sometidos a temperaturas de 30 y 40 °C, respectivamente, tuvieron una humedad inicial muy similar. Al final de la DO, el tratamiento B presentó una menor humedad final que el A, de 58 y 64 %, respectivamente. En este caso una mayor temperatura de la disolución resultó en mayor pérdida de humedad. En el segundo grupo, con los tratamientos C y D, la humedad inicial es menor en el tratamiento C, el cual fue sometido a una menor temperatura. Sin embargo, al final del proceso, C y D tuvieron una humedad final de 51.8 y 50.7 %, respectivamente. El tercer grupo, es decir, los tratamientos E y F, presentan una ligera diferencia de humedad inicial. El tratamiento F tuvo una humedad final de 46.5 %, menor que la de E de 52.6 %, lo que coincidió con los tratamientos anteriores. Una mayor temperatura de deshidratación condujo a una menor humedad final.

En términos generales, el tratamiento F fue el que presentó una menor humedad final; 46.5 %. Este tratamiento fue el más extremo. El tratamiento A llevado a cabo a 30 °C sin APH, tuvo una mayor humedad final; 64.4 %. Entre los tratamientos A y F hay una diferencia de humedad final de 20 %. Esto permite apreciar el efecto combinado de la APH y el aumento de temperatura de la disolución osmótica. En los tratamientos B y D se logra apreciar un pseudo-equilibrio a 270 y 300 min, respectivamente.

6.1.1.2. Humedad en papaya maradol

La Figura 12 muestra la humedad de las placas de papaya maradol. La humedad disminuyó gradualmente con el tiempo en todos los casos.

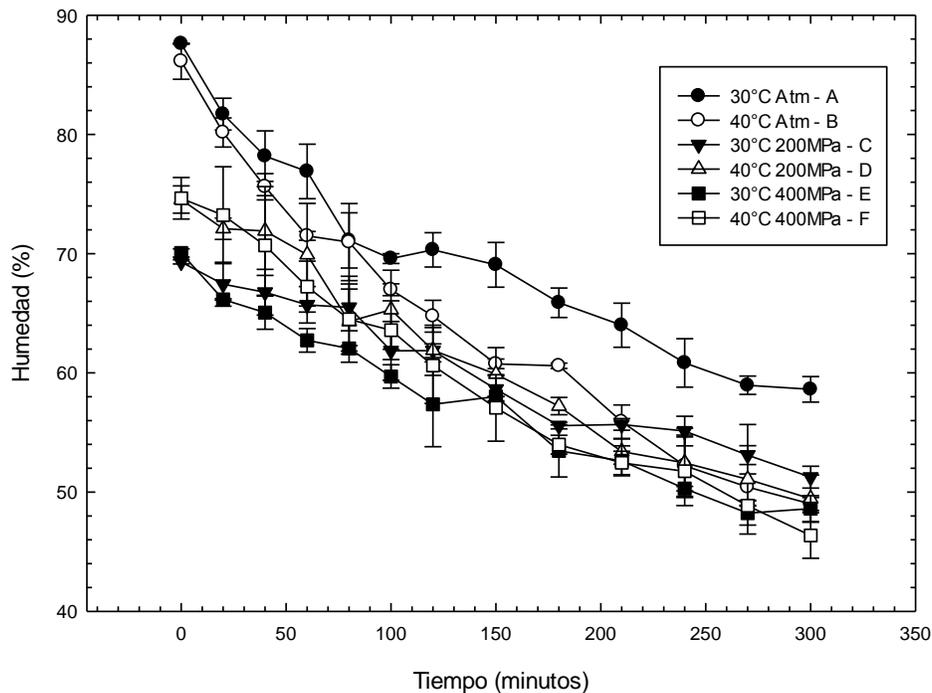


Figura 12. Contenido de humedad (%) de placas de papaya maradol deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

La Tabla 7 muestra que los tratamientos sin APH presentaron una mayor humedad inicial, que aquellos sometidos a APH. El tratamiento A presentó una mayor humedad final. Los tratamientos E y F presurizados a 400 MPa presentaron una menor humedad.

El efecto de la APH se puede apreciar al comparar los tratamientos deshidratados a una misma temperatura. Entre A, C y E el tratamiento A, mostró mayor humedad inicial y final que C y E. Entonces, los tratamientos con APH presentaron una mayor deshidratación. Los tratamientos C y E presentan una humedad inicial muy similar, sin embargo, E tuvo la menor humedad final, en este caso se observa un efecto positivo de las presiones aplicadas sobre la humedad final. Del mismo modo, entre los tratamientos deshidratados a 40 °C (B, D y F), se observa que D y F presentan una humedad inicial muy similar y menor que B. Con respecto a la humedad final, no se aprecia una diferencia significativa entre B y D, a pesar de que el primero no fue presurizado. El tratamiento F fue

el que presentó una menor humedad final; 46.3 %. Entonces al aumentar la presión hubo una menor humedad final en la deshidratación osmótica.

Tabla 7. Indicadores iniciales y finales de deshidratación osmótica para los tratamientos de placas de papaya maradol.

	Humedad (%)		Sólidos Secos (%)		W_L (g agua/g ss)		S_G (g ss/g ss)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
A	87.60	58.62	12.40	41.38	0	3.20	0	1.72
B	86.13	49.00	13.87	51.00	0	3.86	0	1.48
C	69.31	51.25	30.69	48.75	0	0.90	0	0.28
D	74.54	49.45	25.46	50.55	0	1.47	0	0.47
E	70.06	48.62	29.94	51.38	0	1.04	0	0.37
F	74.64	46.36	25.36	53.64	0	1.55	0	0.61

El efecto de la temperatura se aprecia al comparar los tratamientos en tres grupos en los cuales la presión aplicada fue constante. En A y B, los no presurizados, la humedad inicial fue similar; 87.6 y 86.1 %, respectivamente. En cambio, la humedad final fue muy diferente; el tratamiento A mostró una humedad final de 58.6 % y B de 49 %. Este último valor es muy similar al de los tratamientos sometidos a APH. En este caso se aprecia que a una mayor temperatura, hay una menor humedad final. El contenido de humedad inicial entre C y D fue diferente. Sin embargo, al contrario del caso anterior, D fue el que tuvo una mayor humedad inicial de 74.5 %, mientras que C tuvo 69.3 %. Por otro lado, la humedad final fue menor, en el tratamiento a mayor temperatura. En el último par de tratamientos, la humedad inicial de F fue 74.6 %, la cual es mayor que la de E de 70 % a pesar de que este último fue llevado a cabo a una menor temperatura. La humedad final de F fue menor que la de E; 46.3 y 48.6 %, respectivamente. Esta tendencia coincide con lo observado anteriormente.

En general, los tratamientos mantuvieron la misma tendencia en relación con el efecto de la temperatura sobre la humedad final; a mayor temperatura se obtuvo menor humedad final para una presión constante. El tratamiento F tuvo la menor humedad final, 46.36 %, dado que fue sometido a las condiciones de presión y temperatura más extremas. Por otra parte, A tuvo una mayor humedad final de 58.6 %. Entre A y F hubo una diferencia de 12 % en la humedad final, por lo que con este valor se aprecia el efecto positivo sobre la deshidratación osmótica de la combinación temperatura y APH.

6.1.2. Sólidos Secos

6.1.2.1 Sólidos secos en manzana Chihuahua

En la Figura 13, se presenta el contenido de sólidos secos a lo largo de las cinco horas de deshidratación osmótica para las placas de manzana Chihuahua.

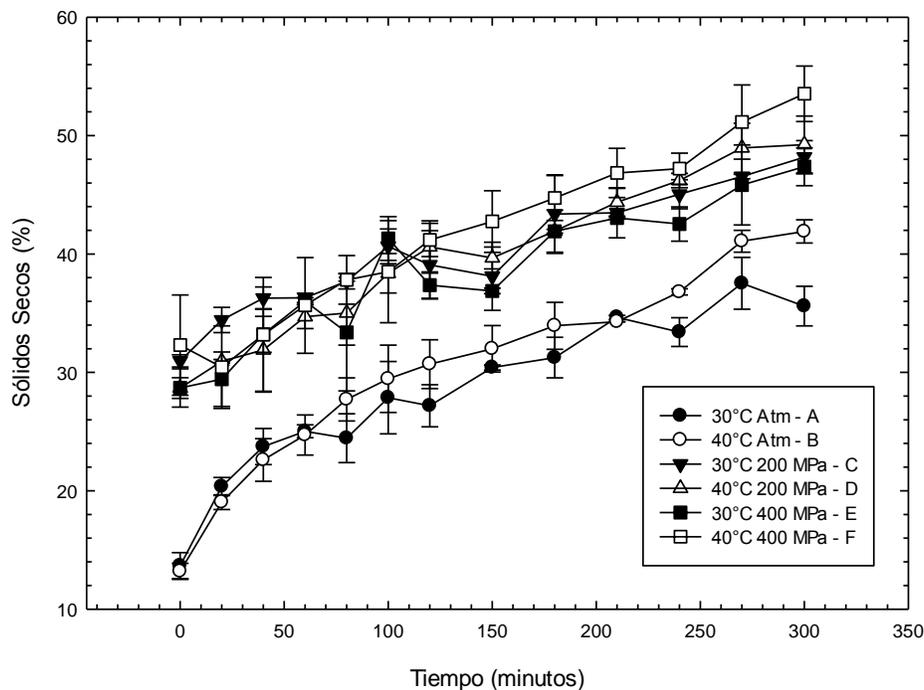


Figura 13. Contenido de sólidos secos (%) de placas de manzana Chihuahua deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

En general, el contenido de sólidos secos aumentó con el tiempo. El contenido de sólidos secos iniciales fue menor en los tratamientos sin APH, con 13 %, mientras que C, D, E y F, mostraron un contenido de sólidos secos inicial, de alrededor de 30 %. Esto está relacionado con la pérdida de humedad que ocurrió durante la APH en el caso de estos últimos cuatro tratamientos. El tratamiento F, sometido a las condiciones más drásticas, mostró el mayor contenido de sólidos secos iniciales y finales con 32.31 %.

El efecto de la APH sobre el contenido de sólidos secos, se observa al comparar los tratamientos deshidratados a una misma temperatura y diferente presión. En los tratamientos deshidratados a 30 °C, A presenta un menor contenido de sólidos secos inicial y final que C y E. Entre estos dos

tratamientos, no se presenta una gran diferencia en el contenido de sólidos secos, aun cuando las presiones aplicadas fueron diferentes.

En los tratamientos deshidratados osmóticamente a 40 °C, B presentó un menor contenido de sólidos secos iniciales y finales que los otros dos tratamientos. Los tratamientos D y F, sometidos a APH, presentaron mayores contenidos de sólidos secos con un valor inicial de 28.7 y 32.3 %, respectivamente, mientras que al final del proceso F tuvo mayor ganancia. En este caso se aprecia un efecto positivo en la ganancia de sólidos secos al someter las placas de manzana a altas presiones, dado que aumentaron los sólidos secos con el aumento de la presión aplicada.

Para observar el efecto de la temperatura sobre el contenido de sólidos secos se compararon los tratamientos por pares, en los cuales la presión se mantuvo como constante y la temperatura varió. El contenido inicial de sólidos secos entre A y B fue muy similar, con 13 %, debido a que no fueron sometidos a APH, por lo que el contenido de sólidos secos es el mismo que contiene una papaya madura, ya que aún no hay un efecto de la deshidratación osmótica en ese momento. Al final de la deshidratación se aprecia que B presentó un contenido de sólidos secos de 41.9 %, mayor que el de A de 35.6 %. En este caso se aprecia el efecto positivo de la temperatura sobre la ganancia de sólidos secos dado que el aumento de temperatura, aumentó el contenido de sólidos secos.

Al inicio de la deshidratación osmótica entre C y D se observa que contrario a lo antes reportado, C presentó un contenido inicial de sólidos secos mayor que D aun cuando este último fue sometido a una mayor temperatura. Al final del proceso el contenido de sólidos secos fue ligeramente mayor en D que en C. En este caso solo se aprecia una diferencia de un punto porcentual en la ganancia de sólidos secos al aumentar la presión aplicada.

Entre E y F el contenido de sólido secos inicial fue menor en E, con 28.7 %, en comparación con F, con un valor inicial de 32.3 %. Esta misma tendencia se presentó al final del proceso ya que E mostró un menor contenido de sólidos secos que F, con 47 y 53 %, respectivamente. En este caso se puede apreciar que al aumentar la temperatura, hubo un aumento en el contenido de sólidos secos.

De forma general el tratamiento que presentó una mayor ganancia de sólidos secos al término del proceso fue F, el cual fue sometido a las condiciones más drásticas. El contenido de sólidos secos final fue 53.53 %. Por otro lado, el tratamiento que presentó un menor contenido de sólidos secos iniciales fue A, tratamiento sometido a una temperatura de 30 °C sin APH, con un valor final de 35.6 %. Entre A y F, hubo una diferencia en el contenido de sólidos secos finales de 18 %, debida al efecto combinado de la temperatura y a presión. Al aumentar ambas aumentó también la transferencia de masa, i.e. agua y solutos, en ambos sentidos durante la deshidratación osmótica. Esto ocasionó un aumento en el contenido de sólidos secos finales.

6.1.2.2. Sólidos secos en papaya maradol

La Figura 14 muestra que a lo largo del tiempo todos los tratamientos presentaron un aumento gradual en el contenido de sólidos secos, particularmente un mayor contenido en aquellos sometidos a APH.

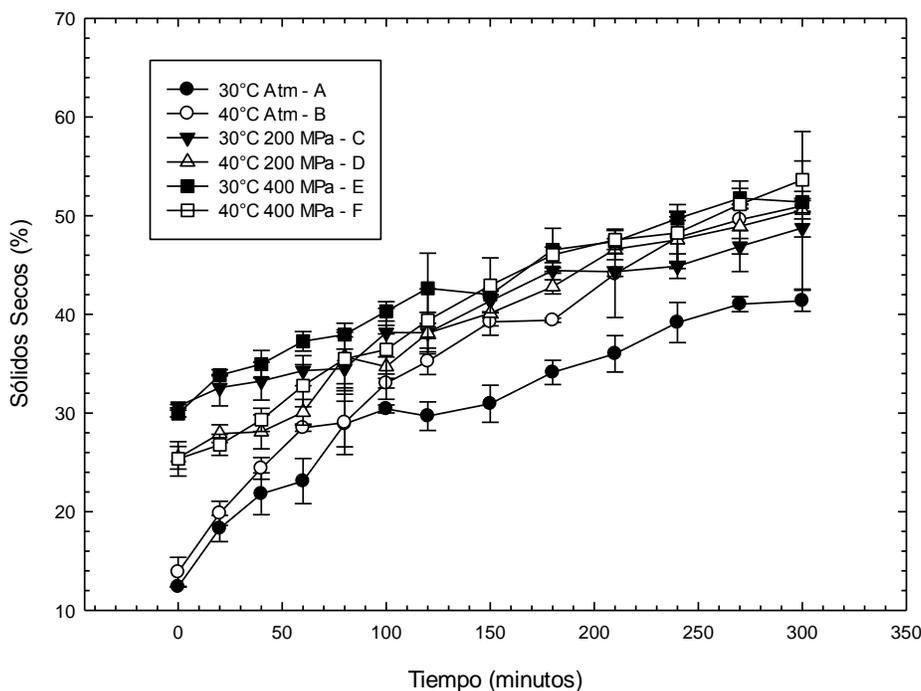


Figura 14. Contenido de sólidos secos (%) de placas de papaya maradol deshidratada en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

En relación con el contenido de sólidos secos iniciales, A y B, presentaron un menor contenido, aproximadamente 13 %, mientras que C, D, E y F, presentaron un mayor valor, entre 25 y 30 % aproximadamente. El tratamiento C presentó un mayor contenido de sólidos secos iniciales. En cuanto al contenido de sólidos secos finales, el tratamiento A mostró el menor contenido de sólidos secos, con un valor final de 41.3 %, mientras que los demás tratamientos tuvieron valores finales entre 48 y 53 %. El tratamiento que presentó un mayor contenido de sólidos finales fue F.

Para observar el efecto de la APH sobre el contenido de sólidos secos se compararon aquellos tratamientos en los cuales la temperatura fue constante. En el primer grupo están A, C y E, y en el segundo B, D y F, en estos dos grupos se varió la presión.

En el primer grupo, A tuvo un menor contenido de sólidos secos iniciales, en comparación con C y E. Entre los dos últimos tratamientos no se observó alguna diferencia considerable, aun cuando fueron

sometidos a 200 y 400 MPa, respectivamente. Asimismo, A mostró el menor contenido de sólidos secos finales, 41.4 %, en comparación con C y E, los cuales presentaron valores de 48.8 y 51.4 %, respectivamente. Al aplicar la APH, el contenido de sólidos secos finales aumentó en forma proporcional con el incremento de la presión aplicada, ya que el tratamiento E obtuvo el mayor contenido de sólidos secos finales.

Entre B, D y F, los sometidos a APH, presentaron un contenido muy similar de sólidos secos iniciales de aproximadamente 25 %, mientras que B, presentó un menor contenido inicial de 13.9 %. Al final de la deshidratación, no se apreció una diferencia considerable entre B y D, mientras que F mostró un pequeño aumento, con un valor final de sólidos secos de 53.6 %. Por otro lado, B y D mostraron un valor de 51 y 50.5 %, respectivamente. Se muestra el efecto positivo de la APH sobre los sólidos secos al final del proceso en F, que fue sometido a 400 MPa.

Para apreciar el efecto de la temperatura sobre los diferentes tratamientos en los cuales la presión aplicada fue la misma, mientras que la temperatura de la disolución osmótica fue diferente.

En A y B, el contenido de sólidos secos iniciales es muy similar. Al final se logró percibir una cierta diferencia en el contenido de sólidos secos finales. El tratamiento B, presentó una mayor concentración de sólidos secos finales, con 51 %. En este caso se muestra que a mayor temperatura, aumentó la tasa de transferencia de sólidos hacia el alimento.

En el segundo par de tratamientos (C y D), el contenido de sólidos secos inicial fue mayor en C, con 30.7 %. Con respecto al contenido final de sólidos secos, la tendencia es la esperada, ya que D tuvo una mayor cantidad de sólidos secos, 50.5 %, mientras que C tuvo 48.7 %. En este par de tratamientos, se aprecia ligeramente el efecto de la temperatura al final del proceso de deshidratación, comprobando nuevamente que para una mayor temperatura de deshidratación osmótica se obtiene una mayor cantidad de sólidos secos.

En el tercer grupo de tratamientos (E y F), ocurrió lo mismo que en el caso del grupo anterior, E tuvo un mayor contenido inicial de sólidos secos, con 30 %, mientras que F, tuvo 25.7 %. Por otro lado, con respecto al contenido final de sólidos secos, se puede apreciar el efecto de la temperatura sobre la ganancia de sólidos secos, ya que F obtuvo un mayor contenido, llegando a 53.6 %, mientras que E obtuvo al final 51.4 %, lo que concuerda con lo descrito en los casos anteriores.

En general, la combinación de presión-temperatura que presentó un mayor contenido de sólidos secos finales fue F, ya que fue sometido a las condiciones más drásticas, 400 MPa y 40 °C, para la cual se obtuvo un valor final de sólidos secos de 53.6 %. Por otro lado, el tratamiento A presentó un menor contenido de sólidos secos finales con 41.4 %, muy por debajo de los otros tratamientos. La diferencia porcentual entre A y F, fue aproximadamente 12 %, debido al efecto combinado de presión y temperatura, logrando un aumento en la transferencia de masa en el proceso.

6.1.3. Pérdida de agua (W_L)

6.1.3.1. Pérdida de agua en manzana Chihuahua

En la Figura 15, se presenta la pérdida de agua (W_L) de las placas de manzana Chihuahua. La pérdida de agua aumentó gradualmente con el tiempo en todos los tratamientos.

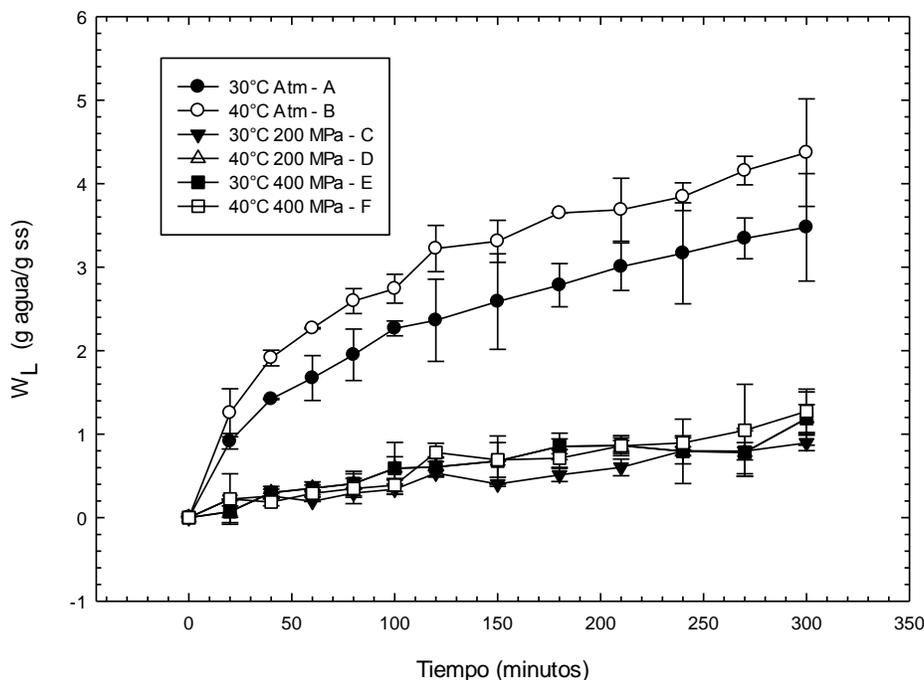


Figura 15. Pérdida de agua (W_L) promedio ($n = 2$) de placas de manzana Chihuahua en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

La pérdida de agua inicial es cero debido a que en ese momento aún no se ha iniciado la deshidratación y no ha habido transferencia de masa. Cabe aclarar, que la aplicación de APH provocó la pérdida de cierta cantidad de agua y ganancia de una cantidad de sacarosa que no se ven reflejadas en los cálculos ni en gráfica, pero sí en la humedad y los sólidos secos.

Con respecto a la pérdida de agua final, los tratamientos no sometidos a APH mostraron una mayor pérdida de agua que aquellos tratados con APH. Esto es debido a que la APH provoca una pérdida de agua previa a la deshidratación, por lo que al inicio del proceso de DO ya presentaban una menor humedad, como se muestra en la Figura 11. Los tratamientos sin APH perdieron una mayor cantidad de agua durante la deshidratación, mientras que los tratamientos con APH perdieron la mayoría

durante la presurización. El tratamiento B fue el que mostró una mayor pérdida de agua durante la deshidratación, por efecto de la temperatura.

Para observar el efecto de la APH sobre la pérdida de agua durante el proceso se compararon los tratamientos con temperatura constante. En el primer grupo (A, C y E), el tratamiento A deshidratado a 30 °C, presentó una mayor pérdida de agua, con un valor final de 3.47 g agua/g ss. Los tratamientos C y E, tuvieron únicamente una pérdida de agua de 0.89 y 0.73 g agua/ g ss, respectivamente, y entre estos no se aprecia una clara diferencia, aun cuando fueron sometidos a diferente presión. Por ende, no hubo un efecto notable de la presión aplicada sobre la pérdida de agua.

En los tratamientos del segundo grupo (B, D y F), el B mostró una mayor pérdida de agua con un valor final de 4.37 g agua/g ss, mientras que D y F, sometidos a APH, tuvieron una pérdida de agua final de 0.78 y 1.27 g agua/g ss, respectivamente. Por lo tanto, F presentó una mayor pérdida de agua que D. El tratamiento B, mostró una mayor pérdida de agua, sin embargo, como se ve en la Figura 11, no fue el tratamiento con una menor humedad al final debido a que los tratamientos con APH ya habían experimentado una pérdida de agua además de aquella pérdida durante la deshidratación osmótica.

Para poder observar los efectos de la temperatura sobre la pérdida de agua se compararon aquellos tratamientos en los cuales la temperatura fue diferente y la presión fue constante. En el primer grupo de tratamientos (A y B), se observa una considerable diferencia entre estos, ya que B tuvo una mayor pérdida de agua con una diferencia de 0.9 g, aproximadamente. Se observa un efecto causado por el aumento de la temperatura sobre el incremento en la pérdida de agua.

Entre C y D, el tratamiento C tuvo una mayor pérdida de agua, con un valor final de 0.89, mientras que D, tuvo un valor de 0.78 g agua/g ss. Esto es contrario a lo observado en el caso anterior. En el caso de los tratamientos sometidos a 400 MPa, F tuvo una mayor pérdida de agua, llegando a perder 1.27 g de agua/g ss, mientras que E, tuvo únicamente 0.73 g agua/g ss. En este caso, al igual que en el primer grupo, se observa el efecto causado por el aumento de la temperatura sobre la pérdida de agua. Sin embargo, en este grupo no es tan marcado este efecto como en el primer caso.

Al observar únicamente este parámetro, el tratamiento que tuvo una mayor pérdida de agua fue B, el cual no fue sometido a APH y fue deshidratado a la mayor temperatura, 40°C. Sin embargo, los tratamientos que fueron sometidos a APH no mostraron una diferencia entre ellos, practicamente todos perdieron la misma cantidad de agua constantemente durante el proceso de DO, sin importar la presión a la que fue sometida cada uno, esto se puede explicar ya que perdieron una cantidad de agua considerable durante la presurización antes de la deshidratación por lo que durante esta ya no hubo una pérdida de agua tan marcada como en A y B. Los tratamientos sometidos a APH presentaron una menor humedad al final del proceso, el cual es el objetivo principal de la

deshidratación. El tratamiento que presentó una menor pérdida de agua fue E, el cual únicamente perdió 0.73 g de agua/ g ss. Entre B y E hay una diferencia de 3.64 g de agua.

El efecto de la temperatura se apreció sobre la pérdida de agua. Por un lado, está fuertemente marcado en los tratamientos sin APH, ya que a mayor temperatura de deshidratación hubo una mayor pérdida de agua, mientras que para los tratamientos con APH no es muy clara esta tendencia. Por otro lado, el efecto de la APH no se aprecia muy claramente en todos los casos, debido a la pérdida de agua sufrida al aplicar la APH.

6.1.3.2. Pérdida de agua en papaya maradol

En la Figura 16, se aprecia que todos los tratamientos van perdiendo agua de manera progresiva durante la deshidratación osmótica. Los tratamientos que no fueron sometidos a APH mostraron una mayor pérdida de agua, que los tratamientos con APH, los cuales no presentaron una diferencia significativa entre ellos. El tratamiento B fue el que tuvo una mayor pérdida de agua, con un valor final de 3.86 g agua/g ss.

Para poder observar claramente el efecto de las APH sobre la pérdida de agua durante la DO, se compararon los tratamientos en los que la temperatura fue constante y con diferente presión aplicada. Con respecto al primer grupo de tratamientos, el tratamiento A que no fue sometido a APH presentó la mayor pérdida de agua al final del proceso, con un valor final de 3.20 g agua/g ss, mientras que en los tratamientos sometidos a APH se observó un ligero efecto positivo sobre la pérdida de agua durante la deshidratación osmótica al aumentar la presión aplicada, ya que el tratamiento E, que se sometió a 400 MPa, presentó una mayor pérdida de agua con valor de 1.04 g agua/g ss, mientras que el tratamiento C, perdió 0.90 g agua/g ss durante el proceso.

Entre los tratamientos B, D y F, se observa que B mostró la mayor pérdida de agua final, ya que presentó un valor final de 3.86 g agua/g ss. Los dos tratamientos (D y F), que fueron sometidos a APH, presentaron una pérdida de agua muy similar, con un valor de 1.47 y 1.55 g agua/g ss respectivamente, por lo que no se apreció un ligero efecto de la presión sobre la pérdida de agua al aumentar la presión.

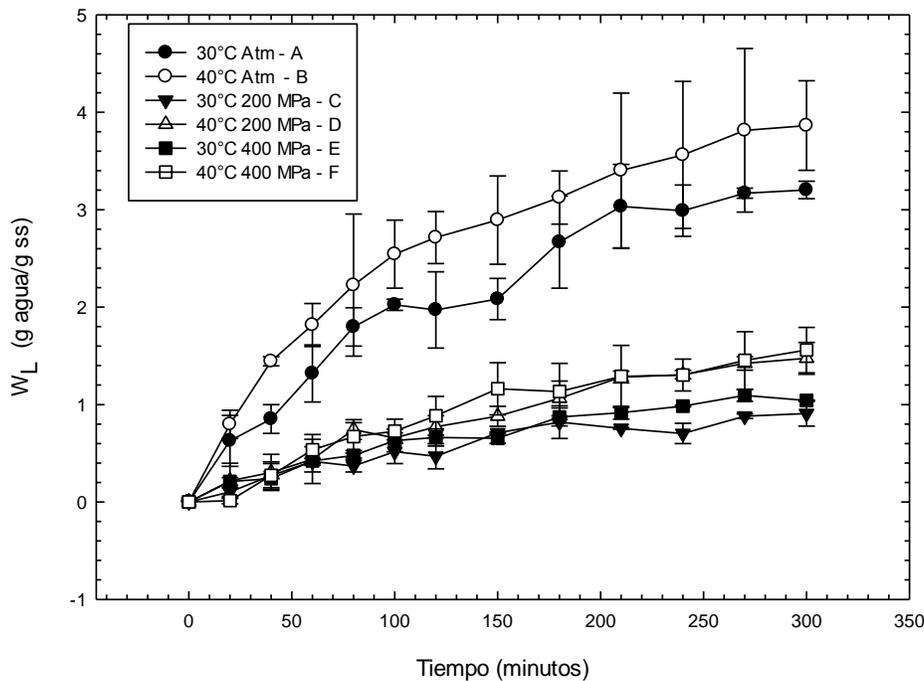


Figura 16. Pérdida de agua (W_L) promedio ($n = 2$) de placas de papaya maradol en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

Para observar el efecto de la temperatura, se analizaron los resultados entre los tratamientos que fueron sometidos a la misma presión y diferente temperatura durante la deshidratación osmótica. En los tratamientos A y B, se observó que el contenido final de pérdida de agua (W_L), fue mayor en B ya que tuvo una pérdida de agua final de 3.86 g agua/g ss, mientras que A, tuvo un valor de 3.20 g agua/g ss. Al aumentar la temperatura aumentó la cantidad de agua pérdida durante la deshidratación. Este mismo comportamiento se presentó en el segundo grupo. El contenido final de W_L de C y D fue 0.90 y 1.47 g agua/ g ss, respectivamente. Se obtuvo una mayor pérdida de agua en D que fue sometido a una mayor temperatura durante la deshidratación osmótica.

Asimismo, esto también se aprecia en E y F, para los que la pérdida de agua final fue 1.04 y 1.55 g agua/g ss, respectivamente. Por ello F fue el que tuvo una mayor pérdida de agua debido a que la temperatura fue más alta que para E, mostrando el efecto positivo de la temperatura sobre la pérdida de agua. El tratamiento que presentó una mayor pérdida de agua fue B. Sin embargo, esto no quiere decir que sea el tratamiento que obtuvo una menor humedad final ya que como se ha mencionado anteriormente los tratamientos que fueron sometidos a APH perdieron cierta cantidad de agua previamente la cual no se ve reflejada en W_L . El tratamiento con una menor pérdida de agua fue C, ya

que durante la aplicación de APH ya se había perdido gran parte de su humedad inicial, además de que fue deshidratado a la menor temperatura.

En general, todos los tratamientos presentaron el mismo efecto sobre la pérdida de agua; un aumento de W_L con la temperatura. Sobre el efecto causado por la aplicación de las APH, se observó un ligero aumento en la pérdida de agua en los tratamientos sometidos a APH al aumentar la presión aplicada. Por otro lado, es difícil equiparar este efecto con los tratamientos que no fueron sometidos a APH, ya que estos presentaron una mayor pérdida de agua durante la deshidratación osmótica.

6.1.4. Ganancia de sólidos (S_G)

6.1.4.1. Ganancia de sólidos en manzana Chihuahua

En la Figura 17 se trazó la ganancia de sólidos para todos los tratamientos de las placas de manzana Chihuahua. La ganancia de sólidos va aumentando paulatinamente con el tiempo, aunque no es constante, ya que algunas veces baja y vuelve a subir. También hay que mencionar que la desviación estándar en esta grafica es muy grande, por lo que los datos no son tan confiables como los mostrados en las gráficas anteriores. Los tratamientos que no fueron sometidos a APH presentaron una mayor ganancia de sólidos que aquellos con APH, con valores de 0.58 g ss/g ss para A y 0.59 g ss/g ss para B. Mientras que los tratamientos con APH presentaron una menor ganancia de sólidos con valores de casi 0.25 g ss/g ss, con excepción de F el cual tuvo una menor ganancia de sólidos debido posiblemente a la pérdida de tejido celular de la fruta hacia la disolución osmótica al término del proceso. Por ello se observa una disminución muy drástica de sólidos ganados en la última etapa de la deshidratación osmótica, ocasionada por el tratamiento con APH.

Para poder observar el efecto de las altas presiones hidrostáticas se analizaron los tratamientos en dos grupos, en los cuales, la temperatura en cada grupo es la misma. En el primer grupo, compuesto por A, C y E, cuya temperatura de deshidratación fue 30 °C, los tratamientos sometidos a APH no aumentaron notablemente la ganancia de sólidos debido a dos factores. El primero se debe a que durante el tratamiento con APH sufrieron una transferencia de masa en ambos sentidos perdiendo agua y ganando solutos, por lo tanto durante la deshidratación osmótica ya la tasa de transferencia de masa fue baja. El segundo factor fue el desprendimiento de masa de las placas de fruta hacia la disolución osmótica por el tratamiento con APH dado que se daña la pared celular de la fruta. El tratamiento A, presentó la mayor ganancia de solutos aun cuando las condiciones de proceso fueron las menos drásticas; 30 °C y sin APH.

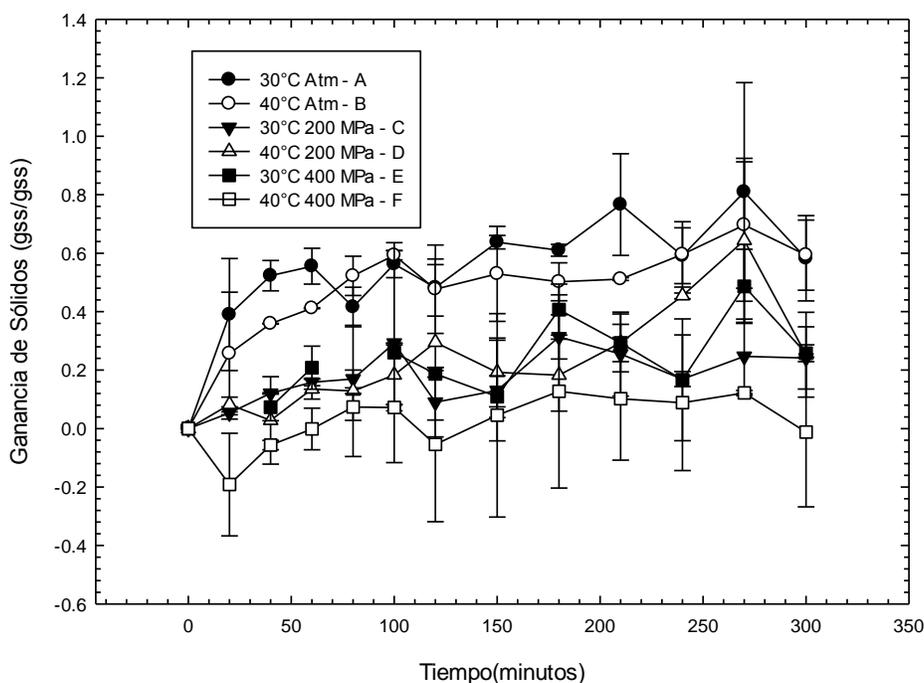


Figura 17. Ganancia de sólidos (s_G) promedio ($n = 2$) de placas de manzana Chihuahua en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

Al analizar el segundo grupo de tratamientos (B, D y F), los cuales fueron deshidratados a una temperatura de 40 °C, el tratamiento B fue el que tuvo una mayor ganancia de sólidos. Los tratamientos con APH, no presentaron ninguna tendencia en la ganancia de sólidos debido al efecto de la presión aplicada; el tratamiento D, tuvo una ganancia de sólidos final de 0.25 g ss/g ss, mientras que F, solo ganó 0.12 g ss/g ss. Esto último debido a que durante la deshidratación osmótica las placas de fruta perdieron tejido celular hacia la disolución osmótica por el daño causado al tejido durante la aplicación de APH. Por ende, no se logra apreciar un efecto de la APH sobre la ganancia de sólidos.

Para analizar el efecto de la temperatura sobre la ganancia de sólidos, se formaron tres pares de tratamientos, en los que la presión aplicada fue la misma. En el primer par de tratamientos (A y B), a lo largo del tiempo, A presentó una mayor ganancia de sólidos que B. Sin embargo, al final del proceso el contenido de sólidos es prácticamente el mismo. Por esto, no se aprecia un efecto claro de la temperatura sobre la ganancia de sólidos. Al observar el segundo grupo formado por C y D que fueron tratados a 200 MPa, en los primeros 80 minutos la ganancia de sólidos fue prácticamente la misma. A partir de 100 min, C presentó una mayor ganancia de sólidos aun cuando este tratamiento

fue deshidratado a una menor temperatura. Sin embargo, al final del proceso el contenido de ganancia de sólidos fue prácticamente el mismo entre estos dos tratamientos. Al analizar el tercer grupo (E y F), que fueron sometidos a 400 MPa, E permaneció con una mayor ganancia de sólidos que F a lo largo de la deshidratación, aun cuando este último fue tratado a una mayor temperatura. Por lo tanto, en este caso la temperatura no presentó un efecto directo sobre la ganancia de sólidos. De hecho, tiende a haber una mayor ganancia de sólidos a una menor temperatura de deshidratación.

El tratamiento que presentó una mayor cantidad de ganancia de sólidos finales fue B, con 0.25 g ss/g ss, con A muy cerca de este valor final; 0.24 g ss/ g ss. El tratamiento que obtuvo una menor cantidad de sólidos ganados fue F, que fue sometido a las condiciones más drásticas. Su valor final de ganancia de sólidos fue 0.12 g ss/g ss. Al comparar B y F, existe una diferencia de 0.47 g ss/g ss. Los tratamientos sin APH tuvieron una mayor ganancia de sólidos sin que la temperatura tuviera gran efecto sobre dicha ganancia. Por otro lado, los tratamientos sometidos a APH presentaron una menor ganancia de sólidos. Aquellos sometidos a 200 MPa tuvieron una mayor ganancia de sólidos que los sometidos a 400 MPa, obteniendo que a menor presión aplicada hubo una mayor ganancia de sólidos. Cabe señalar que la desviación estándar es bastante grande posiblemente por la pérdida de tejido de la fruta hacia la disolución osmótica.

6.1.4.2. Ganancia de sólidos en papaya maradol

En la Figura 18 se presenta la ganancia de sólidos en placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente. Asimismo, en la Tabla 7, se presentan los valores de ganancia de sólidos iniciales y finales. A medida que avanzó el proceso, las placas de papaya maradol incorporaron sólidos hacia el interior de su tejido celular principalmente en los tratamientos no sometidos a APH. La ganancia de sólidos se midió desde el comienzo por lo que todos los tratamientos comienzan en cero. Aquellos sin APH presentaron un mayor contenido final de ganancia de sólidos que los presurizados. El tratamiento A tuvo una mayor ganancia de sólidos, mientras que C tuvo una menor ganancia final.

Para analizar el efecto de la APH sobre el contenido de sólidos ganados se compararon los tratamientos en dos grupos con la misma temperatura. En el primer grupo de tratamientos a 30 °C, el tratamiento A tuvo la mayor cantidad de sólidos ganados finales con 1.72 g ss/g ss, mientras que C y E, que fueron sometidos a 200 y 400 MPa, respectivamente, tuvieron un menor contenido, con un valor final de 0.28 y 0.37 g ss/g ss, respectivamente. En el caso de los tratamientos con APH, a mayor presión hidrostática hubo una mayor ganancia de sólidos. Sin embargo, estos tratamientos al tener la pared celular dañada, tuvieron una menor cantidad de sólidos ganados que aquellos sin APH. En el segundo grupo, B que no fue sometido a APH presentó el mayor contenido final de sólidos

ganados, con 1.48 g ss/g ss, mientras que D y F tuvieron un menor contenido, con 0.47 y 0.61 g ss/g ss, respectivamente. Hubo una mayor ganancia de sólidos en F que en D ya que se sometió a una mayor presión. Por ello hubo un ligero efecto positivo sobre la ganancia de sólidos al aumentar la presión. De la misma forma que en el caso anterior, el tratamiento sin APH tuvo una mayor ganancia de sólidos.

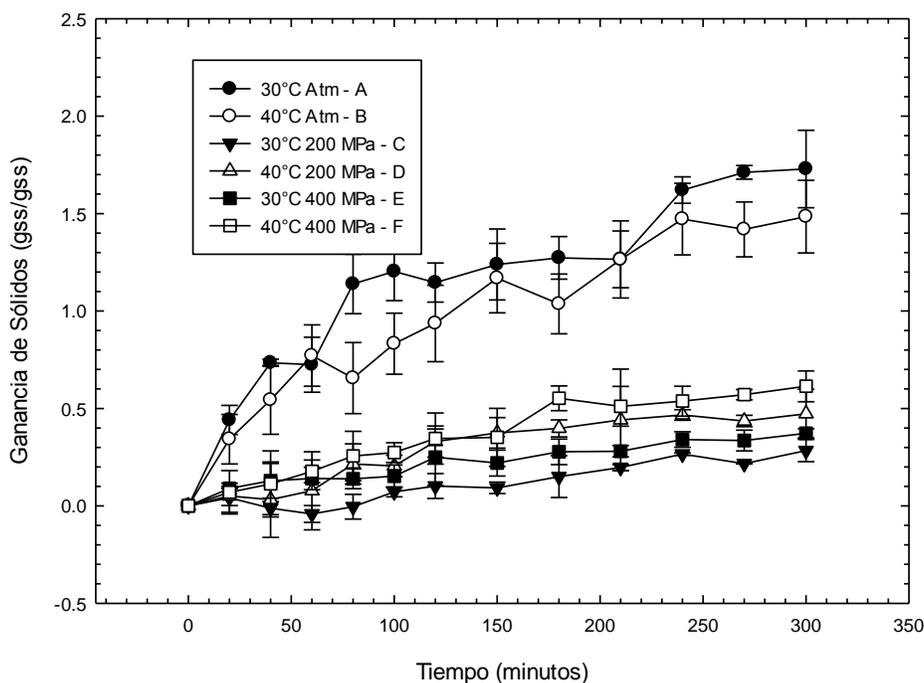


Figura 18. Ganancia de sólidos (s_G) promedio ($n = 2$) de placas de papaya maradol en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones. Las barras de error representan la desviación estándar.

Para observar el efecto de la temperatura sobre la ganancia de sólidos en los diferentes tratamientos, se compararon por pares, cada uno con la misma presión. Hubo un aumento de en la ganancia de sólidos al disminuir la temperatura en los tratamientos sin APH, mientras que en aquellos con APH a mayor temperatura hubo un aumento de sólidos. En el primer par (A y B), al aumentar la temperatura disminuyó la ganancia de sólidos finales ya que A presentó una mayor ganancia de sólidos que B. En el caso de C y D, sometidos a 200 MPa, D mostró una mayor ganancia de sólidos con un valor final de 0.47 g ss/g ss, mientras que C tuvo un contenido final de 0.28 g ss/g ss. En los tratamientos sometidos a 400 MPa se apreció este mismo efecto, ya que F que se deshidrató a 40 °C, tuvo un contenido final de 0.61 g ss/ g ss, mientras que E presentó 0.37 g ss/g ss al final del proceso. El tratamiento A tuvo la mayor ganancia de sólidos con un contenido final de 1.72 g ss/g ss, mientras

que C tuvo la menor ganancia de sólidos con un contenido final de 0.28. La diferencia fue 1.44 g ss/g ss.

6.1.5. Tasa de Deshidratación

6.1.5.1. Tasa de deshidratación osmótica en manzana Chihuahua

Se trazó la gráfica de WL/t vs t , a lo largo de los 300 minutos de deshidratación osmótica, para determinar el periodo de tiempo en el cual la deshidratación osmótica ocurrió a mayor velocidad.

En la Figura 19 se observa el comportamiento de A y B que no fueron sometidos a APH. Al inicio del proceso hubo una mayor velocidad de deshidratación en ambos tratamientos. Conforme transcurrió el tiempo esta velocidad decreció gradualmente y llegó a un valor mínimo al final de la deshidratación osmótica. El tratamiento B, deshidratado a 40 °C, presentó una mayor tasa de deshidratación durante todo el proceso. Una mayor temperatura de operación provocó una mayor tasa de deshidratación.

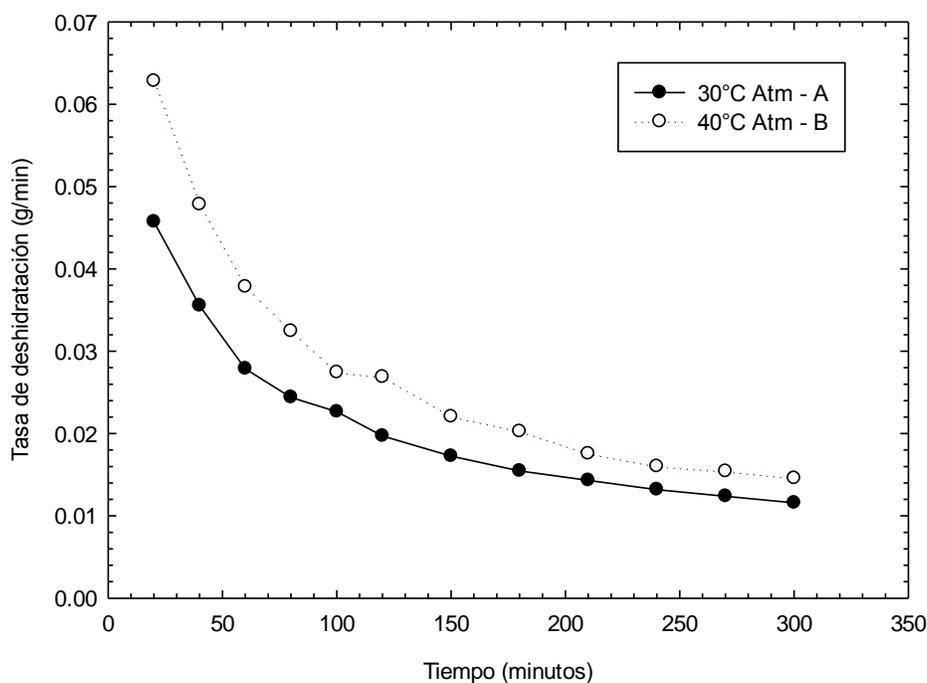


Figura 19. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, para placas de manzana Chihuahua en disoluciones con 60% de sacarosa a diferentes temperaturas y sin aplicación de APH.

En la Figura 20 muestra la tasa de deshidratación para aquellos tratamientos con APH, C, D, E y F. Los tratamientos con APH presentaron una menor tasa de deshidratación que aquellos sin APH. El

tratamiento E presentó una mayor tasa de deshidratación, seguido por F y C. En general, en todos los tratamientos la tasa de deshidratación disminuyó paulatinamente y llegó a un valor mínimo al final de la deshidratación.

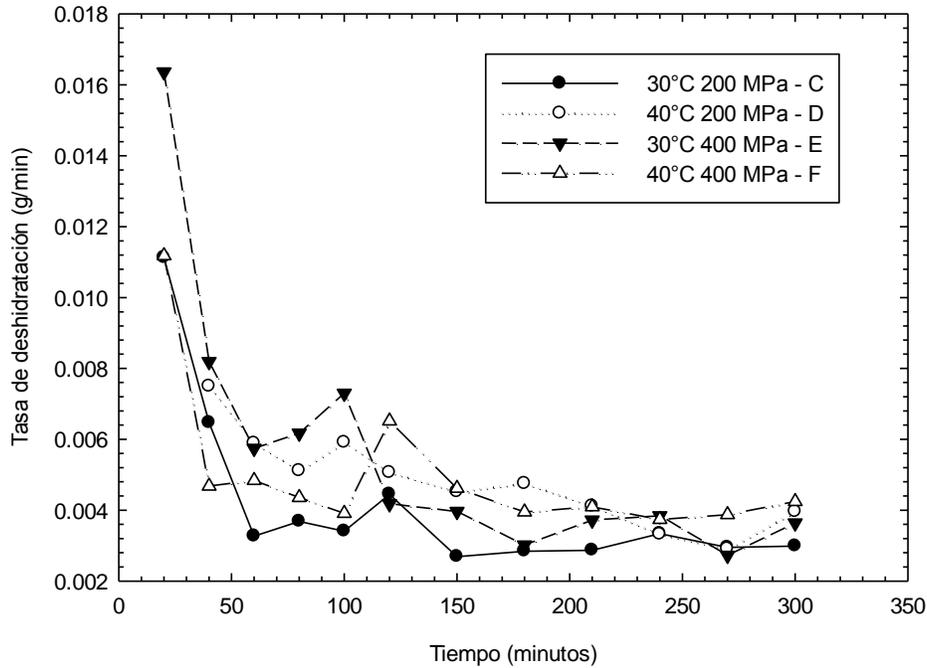


Figura 20. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, para placas de manzana Chihuahua en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones.

6.1.5.2. Tasa de deshidratación en papaya maradol

En la Figura 21 se muestra la tasa de deshidratación para aquellos tratamientos que no fueron sometidos a APH. Ambos tratamientos presentan su máxima al inicio del proceso, y con el avance del tiempo la tasa disminuyó paulatinamente, alcanzando un valor mínimo al final de la deshidratación. El tratamiento B presentó una mayor tasa de deshidratación debido a que fue deshidratado a una temperatura mayor que A. Entonces, la tasa de deshidratación aumentó con la temperatura en este caso sin APH.

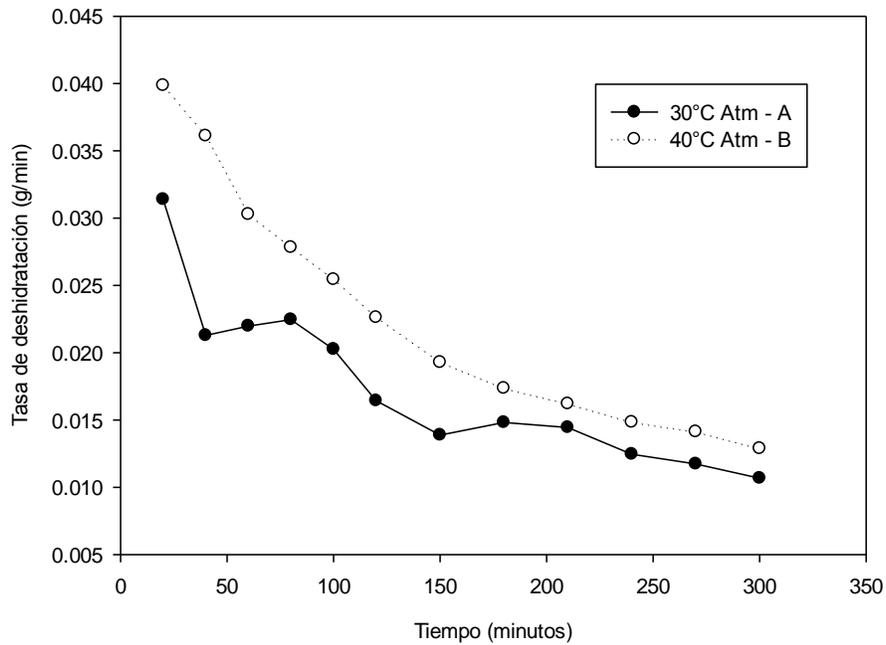


Figura 21. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, en placas de papaya maradol en disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y sin aplicación de APH.

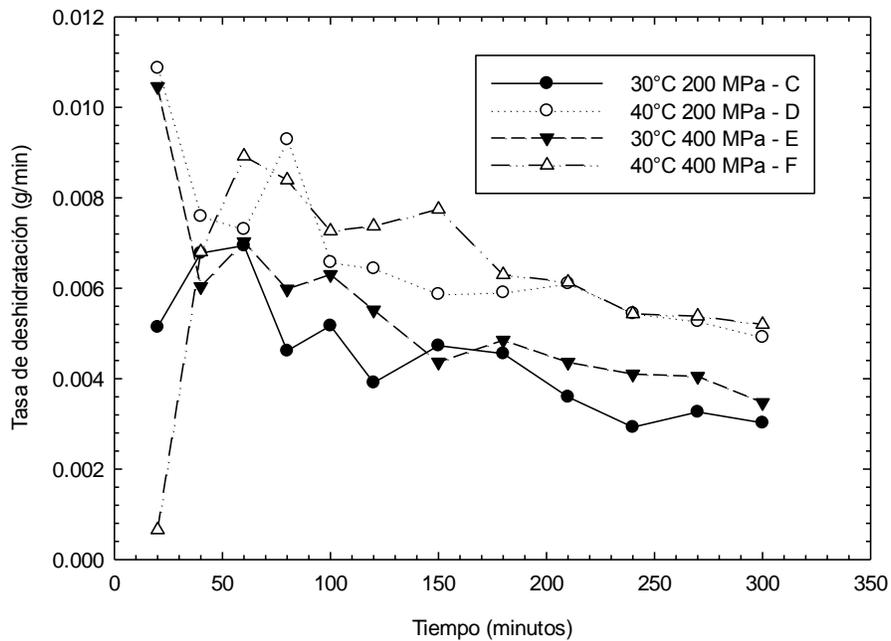


Figura 22. Tasa de deshidratación, pérdida de agua/tiempo vs tiempo, en placas de papaya maradol en una disolución con 60 % de sacarosa a diferentes temperaturas y presiones.

En la Figura 22 se muestra la tasa de deshidratación para los tratamientos sometidos a APH. Los tratamientos D y E presentaron la mayor tasa de deshidratación en los primeros veinte minutos del proceso, mientras que C y F, presentaron un valor muy bajo de velocidad inicial. Con el transcurso del tiempo los tratamientos llegaron a tener velocidades de deshidratación muy similares. En general, los tratamientos sometidos a una mayor temperatura presentaron una mayor tasa de deshidratación en comparación con los tratamientos deshidratados a 30 °C. Asimismo, la máxima tasa de deshidratación alcanzada por los tratamientos sometidos a APH, equivale a los valores más bajos obtenidos por los tratamientos sin APH. Hubo una notable diferencia en la tasa de deshidratación entre unos y otros así como la aplicación de APH, es decir, al aplicar APH la tasa de deshidratación disminuyó drásticamente.

6.2 Cinética de deshidratación osmótica. El modelo de Peleg

6.2.1 Parámetros W_L y S_G en placas de manzana Chihuahua

Los parámetros del modelo de Peleg obtenidos de una regresión lineal para las placas de manzana, se muestran en la Tabla 8. Los datos experimentales comparados con los calculados con el modelo de Peleg para la pérdida de agua y ganancia de sólidos, se encuentran trazados en las gráficas del Anexo 1. Los tratamientos sin APH son los que se adaptan mejor al modelo de Peleg con los valores más altos de r^2 y los menores errores relativos, por lo que también los valores de k_1 y k_2 son confiables para esos tratamientos.

Tabla 8. Parámetros del modelo de Peleg, k_1 y k_2 , error relativo y coeficiente de correlación para los diferentes tratamientos de placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente.

T (°C)	Tratamientos	P (MPa)	Pérdida de agua (W_L)				Ganancia de sólidos (S_G)			
			k_1 (s·g/g)	k_2 (g/g)	r^2	E (%)	k_1 (s·g/g)	k_2 (g/g)	r^2	E (%)
30	A	Atm	21.3766	0.2263	0.9886	0.4318	37.8089	1.3897	0.9064	1.8279
	C	200	104.0618	0.8266	0.9589	7.4908	187.2769	3.0711	0.8779	5.0101
	E	400	136.6244	0.5511	0.7778	5.6822	207.7063	1.3282	0.9597	24.2056
40	B	Atm	14.8823	0.1903	0.9879	0.4611	53.7312	1.4759	0.9539	0.7619
	D	200	154.3088	0.3551	0.8269	2.3088	271.6115	3.0437	0.7452	10.2190
	F	400	210.1571	0.2020	0.8645	8.3084	269.4888	8.3636	0.8732	43.8485

Efecto de la APH sobre W_L

Al observar los valores de los parámetros del modelo de Peleg para la pérdida de agua no se aprecia una tendencia clara de k_2 al aumentar la presión. Los tratamientos A y B, no sometidos a APH, se ajustan bien con este modelo, ya que sus coeficientes de correlación son mayores de 0.98. En el caso de los tratamientos sometidos a APH el modelo no parece ser adecuado y posiblemente no sea confiable al predecir el contenido de humedad final. Esto se puede observar con los valores del coeficiente de correlación y del error relativo. El porcentaje de error calculado es mayor en estos últimos tratamientos. Los valores del coeficiente de correlación son menores de 0.95. El valor de k_1 es mayor al aumentar la presión aplicada en todos los casos.

Efecto de la temperatura sobre W_L

En este caso k_1 , para los tratamientos sin APH es inversamente proporcional a la temperatura. El valor de k_1 disminuye al aumentar la temperatura porque esta constante se relaciona inversamente con la tasa de transferencia de masa. Este mismo comportamiento se observa para k_2 ; al aumentar la temperatura disminuye su valor. En el caso de los tratamientos con APH el comportamiento es errático, k_1 aumenta al aumentar la temperatura mientras que k_2 disminuye.

Efecto de la APH sobre S_G

El valor de k_1 en los tratamientos con APH es mayor sin tener una diferencia significativa entre ellos, mientras que para los tratamientos únicamente DO es menor. Esto se puede explicar recordando que el inverso de k_1 está relacionado con la tasa de transferencia de masa inicial ya que los tratamientos sometidos a APH durante este proceso ya sufrieron cierto intercambio de masa en ambos sentidos. Por lo tanto, durante la deshidratación osmótica la transferencia de masa no es tan intensa como ocurre con A y B. Con respecto al valor de k_2 no se observa ninguna tendencia clara en el efecto de la APH. Únicamente los valores más bajos los presentan los tratamientos A y B. Los tratamientos A, B y E, presentan un coeficiente de correlación aceptable, con un valor superior a 0.90, mientras que C, D y F, presentan un índice de correlación de: 0.8779, 0.7452 y 0.8732, respectivamente.

Efecto de la temperatura sobre S_G

El valor de esta constante aumenta con la temperatura, es decir, hay una menor transferencia de masa al aumentar la temperatura. Esto concuerda con lo descrito en la transferencia de masa por S_G .

Este comportamiento no es el predicho por la teoría, pero la razón aparente de su presencia no se sabe. En el caso de k_2 no se observa una tendencia clara con respecto al efecto de la temperatura.

6.2.2 Parámetros W_L y S_G en papaya maradol

Los parámetros del modelo de Peleg en función de W_L y S_G obtenidos con la ecuación 5b para papaya maradol se muestran en la Tabla 9, así como el coeficiente de correlación y el error relativo, calculado con la ecuación 8. Los tratamientos A y B, sin APH, se ajustaron mejor al modelo de Peleg, ya que su coeficiente de correlación fue 0.9414 y 0.9954, respectivamente, con un menor error relativo; 0.36 y 0.06 %. Por otro lado, los tratamientos con APH, tuvieron un coeficiente de correlación (r^2) de 0.7996 a 0.9399 y un el error relativo también mayor; 0.64 a 4.5 %. El modelo de Peleg no se ajusta adecuadamente para los procesos de deshidratación osmótica combinados con APH.

Efecto de APH sobre W_L

Con respecto a los parámetros del modelo para W_L , k_1 es menor para los tratamientos sin APH. Entonces, estos tratamientos presentan una mayor tasa de transferencia de masa según la ecuación 6, expresada como $1/k_1$, seguidos por los tratamientos a 400 MPa, y por último los sometidos a 200 MPa. Esto se debe a que los tratamientos sin APH tuvieron un mayor gradiente de presión durante la deshidratación osmótica, mientras que los otros tratamientos ya experimentaron un intercambio de masa previamente, disminuyendo así este gradiente de presión, presentado una mayor transferencia de masa aquellos tratamientos a 400 MPa que a 200 MPa. Con respecto a k_2 , tiene un mayor valor en los tratamientos con APH, con valores muy similares entre las dos presiones, mientras que los tratamientos sin APH tienen valores más bajos.

Efecto de la temperatura sobre W_L

La constante k_1 disminuye al aumentar la temperatura de deshidratación. Esto se debe a que esta constante se relaciona inversamente con la tasa de transferencia de masa (ecuación 6), es decir, hay una mayor transferencia de masa al aumentar la temperatura. Esta misma tendencia se observa con k_2 dado que disminuye con el aumento de la temperatura de deshidratación.

Tabla 9. Parámetros del modelo de Peleg, k_1 y k_2 , error relativo y coeficiente de correlación para los diferentes tratamientos de placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente.

T (°C)	Tratamiento	P (MPa)	Pérdida de agua (W_L)				Ganancia de sólidos (S_G)			
			k_1 (s·g/g)	k_2 (g/g)	r^2	E (%)	k_1 (s·g/g)	k_2 (g/g)	r^2	E (%)
30	A	Atm	33.1199	0.1975	0.9414	0.3661	43.4809	0.4671	0.9291	0.8889
	C	200	142.5402	0.6380	0.7996	0.7880	544.6670	2.3004	0.6714	17.6529
	E	400	115.2081	0.5492	0.8938	0.6438	318.9312	1.8307	0.7977	2.0334
40	B	Atm	21.3094	0.1901	0.9954	0.0697	62.2039	0.4843	0.9201	0.8903
	D	200	106.7809	0.3248	0.8343	0.5391	318.6609	0.9145	0.7118	4.3417
	F	400	93.3136	0.3420	0.9399	4.5567	292.9464	0.6480	0.8861	1.1362

Efecto de la APH sobre S_G

En relación con el comportamiento de los parámetros del modelo de Peleg con la diferencia de presión aplicada para cada tratamiento, la constante k_1 es menor para los tratamientos deshidratados sin APH, mientras que para los tratamientos sometidos a APH, k_1 es mayor para aquellos a 200 MPa que a 400 MPa, es decir, hay una mayor transferencia de masa en los tratamientos sin APH, seguido por los a 400 MPa y por último aquellos a 200 MPa. Con respecto a la constante k_2 , se observa el mismo comportamiento que k_1 ya que los tratamientos sin APH presentan un menor valor, seguido por los tratamientos a 400 MPa, y por último a 200 MPa, que son los que presentan los valores más altos. El modelo de Peleg se ajusta mejor para aquellos tratamientos sin APH ya que presentan coeficientes de correlación superiores a 0.92, mientras que los tratamientos sometidos a APH, presentan coeficientes de correlación menores, con valores de 0.6714 a 0.8861. Asimismo, el porcentaje de error relativo es menor para los tratamientos sometidos únicamente a deshidratación osmótica (0.89 %), mientras que los tratamientos con APH, presentan valores de error relativo mucho más grandes.

Efecto de la temperatura sobre S_G

No se observa un efecto claro de la temperatura sobre k_1 , ya que en el caso de los tratamientos sin APH, aumenta al aumentar la temperatura, mientras que para los tratamientos sometidos a APH ocurre lo contrario, ya que presentan un menor valor de k_1 al aumentar la temperatura. Con respecto a la constante k_2 , en los tratamientos sin APH no hay una diferencia significativa entre ellos, mientras que para los tratamientos con APH, k_2 disminuye al aumentar la temperatura.

6.3 Transferencia de masa. Difusividad efectiva

A partir de la segunda ley de Fick, ecuación 9, se trazó la gráfica de $\ln Y$ vs t , donde Y puede ser la pérdida adimensional de agua o la ganancia adimensional de sólidos, como se expresa en las ecuaciones 14a y 17a. Se obtuvo la pendiente de la recta y el coeficiente de la difusividad efectiva (D_e), para las placas de fruta deshidratada osmóticamente. Los valores de D_e se muestran en las Tablas 12 y 13 para los diferentes tratamientos.

6.3.1 Difusividad efectiva en manzana Chihuahua

En la Tabla 10 se muestran las difusividades másicas efectivas calculadas para la pérdida de agua (W_L), y la ganancia de sólidos (S_G), en las placas de manzana. Todas las difusividades efectivas para W_L y S_G , tienen orden de magnitud 10^{-10} . Asimismo, los valores de D_e para la pérdida de agua son mayores que para la ganancia de sólidos. En la tablas 10 y 11 los valores se expresan de la forma: $D_e \times 10^{10}$, para evitar escribir en cada valor 10^{-10} .

Tabla 10. Difusividad efectiva de W_L y S_G en manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente.

T (°C)	Tratamientos	P (MPa)	D_e (m^2/s) $\times 10^{10}$	
			Pérdida de agua (W_L)	Ganancia de sólidos (S_G)
30	A	Atm	9.17	7.02
	C	200	4.79	2.66
	E	400	3.12	2.85
40	B	Atm	8.82	4.34
	D	200	4.74	3.65
	F	400	6.00	1.40

Efecto de la temperatura sobre la difusividad efectiva de pérdida de agua

La D_e para la pérdida de agua (W_L) del tratamiento A, es mayor que la de B aun cuando la temperatura de A es 30 °C. Al aumentar la temperatura disminuyó la difusividad efectiva. En C y D, sometidos a 200 MPa, los valores del coeficiente de difusividad son muy similares entre sí por lo que no se observa un efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión para W_L . Para E y F, sometidos a 400 MPa, el tratamiento F tiene un mayor valor de D_e que el E, por lo que en este caso se observa un efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusividad; mayor temperatura resulta

en mayor difusividad efectiva. Se esperaba que la temperatura aumentara la difusividad másica, sin embargo eso no sucedió en la mayoría de los tratamientos.

Efecto de la temperatura sobre la difusividad efectiva de ganancia de sólidos

En los tratamientos A y B, sometidos únicamente a deshidratación osmótica, no se aprecia un efecto de la temperatura sobre D_e , ya que A, deshidratado a una menor temperatura, presentó un mayor coeficiente de difusividad que B. Entre C y D, sometidos a 200 MPa, se observa que D presenta una mayor D_e , por lo que en este caso se aprecia un aumento en la difusividad efectiva al incrementar la temperatura. Los tratamientos E y F, sometidos a 400 MPa, muestran que E, sometido a una menor temperatura, tuvo un mayor coeficiente de difusividad que F el cual fue sometido a una mayor temperatura, por lo que en este caso no se observa un efecto positivo al aumentar la temperatura. También en los valores de la difusividad de ganancia de sólidos no se observa lo esperado.

Efecto de la APH sobre la difusividad efectiva de pérdida de agua

En los A, C y E, la difusividad efectiva disminuye al aumentar la presión, ya que el tratamiento sin APH, tiene una D_e mayor, seguido por C, sometido a 200 MPa, y por último, E, sometido a 400 MPa. Para los tratamientos B, D y F, el tratamiento B, sin APH, tiene una mayor difusividad efectiva. Sin embargo, esta tendencia cambia con los tratamientos con APH, ya que el tratamiento con mayor difusividad efectiva es el sometido a 400 MPa, mientras que D presenta el menor valor.

Efecto de la APH sobre la difusividad efectiva de ganancia de sólidos

Con respecto al efecto de las APH sobre la difusividad efectiva (Tabla 10) en la ganancia de sólidos, los tratamientos deshidratados a 30 °C (A, C y E), el tratamiento con mayor D_e , es A, el cual no fue sometido a APH. Por otro lado, los tratamientos sometidos a APH no presentan una diferencia significativa, aun para diferente presión. Los tratamientos (B, D y F), deshidratados osmóticamente a 40 °C, tienen el mismo comportamiento, B presenta una mayor difusividad efectiva que los dos tratamientos con APH. De los tratamientos D y F, el que presentó mayor difusividad efectiva fue el sometido a 400 MPa, mientras que D fue el que presentó una menor D_e .

En términos generales, el tratamiento A fue el que presentó una mayor difusividad efectiva para S_G y W_L . El tratamiento E presentó la menor difusividad efectiva para la pérdida de agua., y el tratamiento que presentó la menor D_e , para S_G fue F, el cual fue sometido a las condiciones más drásticas.

6.3.2. Difusividad efectiva en papaya maradol

En la Tabla 11 se muestran las difusividades másicas efectivas de pérdida de agua y ganancia de sólidos, obtenidas con la ecuación 9, para la papaya maradol. En general, las difusividades efectivas presentan un orden de magnitud de 10^{-10} .

Tabla 11. Difusividad efectiva de W_L y S_G en papaya maradol deshidratada osmóticamente.

T (°C)	Tratamientos	P (MPa)	D_e (m^2/s) x 10^{10}	
			Pérdida de agua (W_L)	Ganancia de sólidos (S_G)
30	A	Atm	8.21	10.5
	C	200	7.69	3.37
	E	400	9.25	6.44
40	B	Atm	11.0	6.72
	D	200	6.56	12.4
	F	400	8.60	6.54

Efecto de la temperatura sobre la difusividad efectiva de la pérdida de agua

En los tratamientos A y B al aumentar la temperatura aumenta la difusividad de agua, ya que B, deshidratado a 40 °C, presentó una mayor D_e que A. Los tratamientos con APH presentan un comportamiento diferente. En el caso de C y D, se observa un efecto inversamente proporcional al aumentar la temperatura, ya que C presenta un mayor valor de difusividad efectiva, que D, aun cuando este último fue deshidratado a 40 °C. Los tratamientos E y F presentan la misma tendencia anterior, ya que E, sometido a una menor temperatura, presenta una mayor D_e .

Efecto de la temperatura sobre la difusividad efectiva de la ganancia de sólidos

En los tratamientos A y B, sin APH, el tratamiento A, presenta una mayor D_e , aun cuando B fue deshidratado a una mayor temperatura, igual que en placas de manzana. Entre los tratamientos C y D, sometidos a 200 MPa, se observa un efecto positivo de la temperatura sobre D_e , ya que D, deshidratado a 40°C, presenta una mayor difusividad que C, por lo que en este caso hay un aumento en la difusividad de sólidos al aumentar la temperatura durante la deshidratación. En el último par de

tratamientos, hay muy poca diferencia entre las difusividades obtenidas, ya que F, tuvo un valor de $6.54 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que E, tiene una difusividad efectiva de $6.44 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. En este caso sólo se presenta un ligero aumento de la difusividad con la temperatura.

Efecto de la APH sobre la difusividad efectiva de la pérdida de agua

En los tratamientos A, C y E, deshidratados a 30 °C, se observa que E, presenta la mayor D_e , seguido por A. Por último, el tratamiento que presentó una menor difusividad efectiva en la pérdida de agua fue C, el cual fue sometido a 200 MPa. En este caso solo hay un aumento notorio en la difusividad efectiva al aplicar 400 MPa con respecto al tratamiento sin altas presiones. En el caso de B, D y F, deshidratados osmóticamente a 40 °C, B mostró una mayor difusividad efectiva, seguido por F, y por último fue el D, el cual fue sometido a 200 MPa. En este caso el tratamiento sin APH tuvo una mayor difusividad efectiva. Se observa solo cierta tendencia con los tratamientos sometidos a APH, a mayor presión aplicada hubo un aumento de la difusividad efectiva sin llegar a superar el valor obtenido por el tratamiento B.

Efecto de la APH sobre la difusividad efectiva de la ganancia de sólidos

Entre los tratamientos deshidratados a 30°C, el tratamiento A presenta la mayor difusividad efectiva para la ganancia de sólidos (Tabla 11). En segundo lugar, se encuentra E, el cual fue sometido a 400 MPa, y por último C, sometido a 200 MPa. En este caso el tratamiento con mayor D_e , fue A, sin APH. Por otro lado, entre los tratamientos que fueron sometidos a APH, el tratamiento que fue sometido a mayor presión presentó un mayor valor de D_e de ganancia de sólidos, por lo que entre estos tratamientos se observa un efecto de la presión aplicada sobre el aumento de la difusividad efectiva. En los tratamientos B, D y F, deshidratados a 40 °C, el tratamiento con mayor difusividad efectiva es D, el cual fue tratado a 200 MPa, mientras que B y F, presentan valores de D_e muy similares. Por lo tanto, en estos tratamientos no se observa una tendencia clara de la D_e debido a la presión aplicada. De manera general, el tratamiento con mayor difusividad efectiva para la pérdida de agua, fue B, mientras que para la ganancia de sólidos, fue D, sometido a 200 MPa y deshidratado osmóticamente a 40 °C. Por otro lado, los tratamientos que presentaron la menor D_e , fueron D para W_L , mientras que para S_G el tratamiento con menor difusividad efectiva fue C.

6.4 Índice de efectividad

6.4.1 Manzana Chihuahua

Las Figuras 23 y 24, se muestran el índice de efectividad en diferentes tiempos para manzana Chihuahua de los distintos tratamientos para temperatura y presión.

Efecto de la temperatura

En el caso de los tratamientos sin APH, desde un inicio el proceso está influenciado principalmente por la temperatura, ya que el IE es mayor para B, cuya temperatura fue mayor. Al final de la deshidratación, B tuvo un IE de 7.36, mientras que el de A fue 5.97. Por otro lado, los tratamientos con APH, C y E, presentan un mayor IE al inicio del proceso que D y F. En los tratamientos C y D, sometidos a 200 MPa, presenta un IE mayor el tratamiento deshidratado a 30 °C, excepto al final del proceso, en el cual el tratamiento E obtuvo un mayor valor logrando apreciar el efecto de la temperatura.

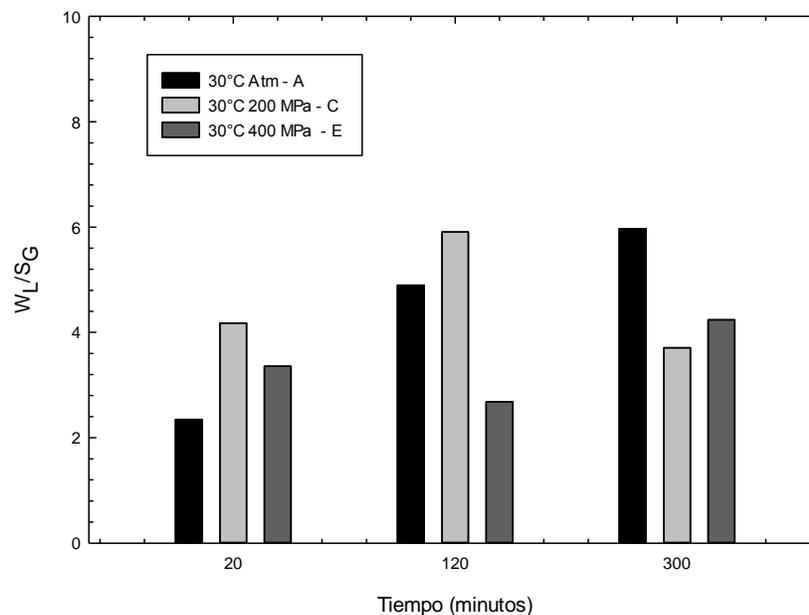


Figura 23. Índice de efectividad para diferentes tiempos de deshidratación osmótica para manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 30 °C y con tratamiento a diferentes presiones.

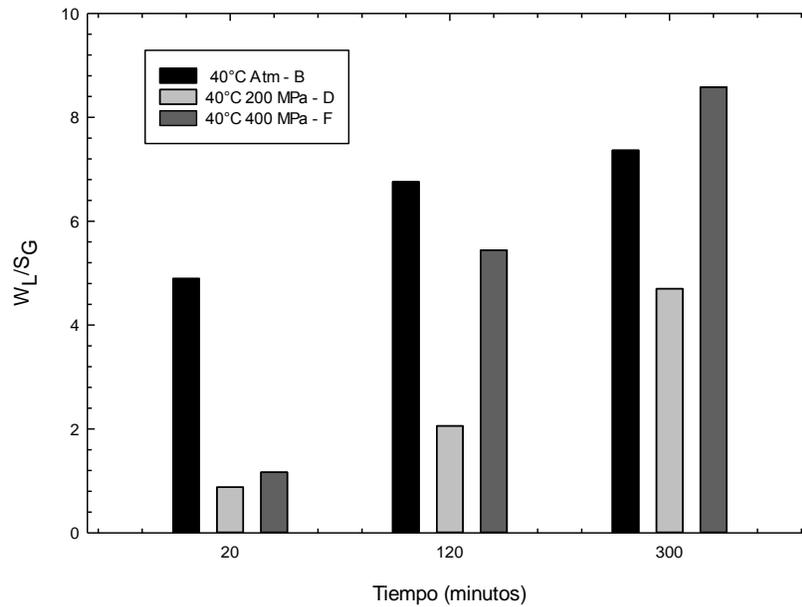


Figura 24. Índice de efectividad para diferentes tiempos de deshidratación osmótica, para manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 40 °C y con tratamiento a diferentes presiones.

En los tratamientos D y F, sometidos a 400 MPa, se observa que al inicio de la deshidratación el tratamiento sometido a menor temperatura presenta un mayor IE, en comparación con el otro tratamiento. Conforme transcurre el tiempo, el tratamiento F va aumentando su IE, hasta llegar a un valor final de 8.5, un poco más del doble que el valor final que presenta E. Los dos tratamientos presentan su máximo valor de IE al final de la deshidratación. Se observa otra vez el mismo comportamiento que en el caso anterior; la temperatura tiene un efecto positivo en el IE conforme pasa el tiempo de deshidratación ya que al inicio del proceso no se observa este efecto.

Efecto de la APH

En este caso, se observó que los tratamientos sometidos a APH presentan un mayor IE desde el principio de la deshidratación osmótica, mientras que el tratamiento sin APH, tarda un poco más de tiempo en alcanzar valores similares a los otros tratamientos, ya que su máximo IE lo alcanzó hasta el término de la deshidratación, lo que C logró a los 120 min de la deshidratación.

En los tratamientos a 40 °C, B, D y F, el tratamiento sin APH presentó un aumento constante del IE, hasta alcanzar su máximo al término de la DO. Mientras que entre los tratamientos con APH el tratamiento sometido a mayor presión fue el que presentó mayor IE en todo el proceso en comparación con el sometido a 200 MPa.

El tratamiento F fue el que presentó el mayor IE durante la etapa final de la deshidratación osmótica, seguido por A y B, los cuales no fueron sometidos a APH. El tratamiento F, también presentó un menor porcentaje final de humedad (46 %) y el mayor contenido de sólidos secos finales (53,53 %), mientras que A y B, presentaron mayor pérdida de agua, 3.47 y 4.37 g agua/ g ss, respectivamente, y mayor ganancia de sólidos, 0.58 y 0.59 g ss/g ss, respectivamente.

6.4.2 Papaya maradol

Las Figuras 25 y 26 muestran el índice de efectividad en diferentes tiempos para placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente.

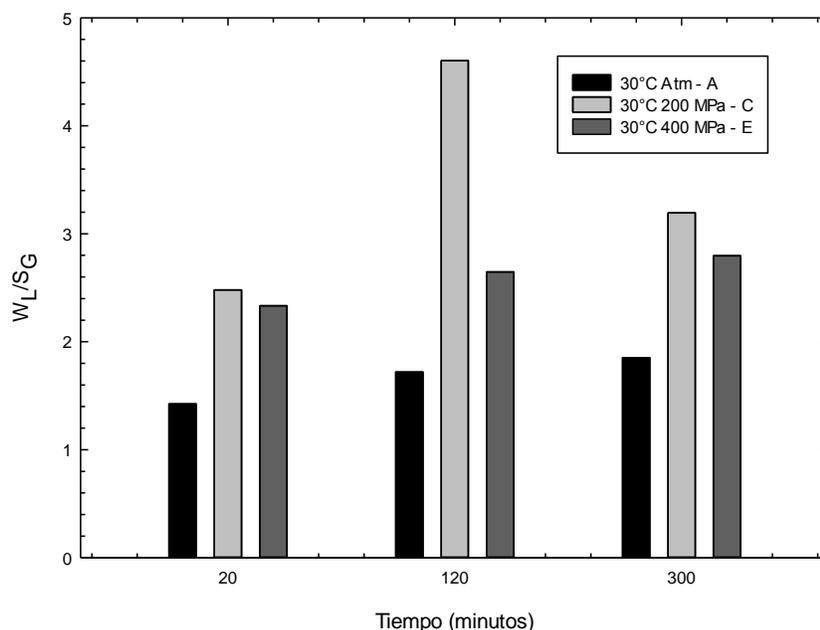


Figura 25. Índice de efectividad para diferentes tiempos en papaya maradol deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 30 °C y con tratamiento a diferentes presiones.

Efecto de la temperatura

En los tratamientos sin APH, al aumentar la temperatura de deshidratación hay un mayor IE. A la mitad de la DO, aumenta la relación W_L/S_G , lo que indica que en esta etapa hubo una mayor pérdida de agua que ganancia de sólidos, lo que es deseable para el propósito de la deshidratación. Entre los tratamientos C y D, sometidos a 200 MPa, no se observa un efecto de la temperatura sobre el IE, ya que al inicio el tratamiento D presenta un mayor IE. Sin embargo, a la mitad del proceso esta relación se invierte, C presenta un mayor IE. Al final del proceso los dos tratamientos presentan un valor de IE

muy similar, aun cuando, ambos fueron sometidos a diferentes temperaturas de deshidratación. En estos tratamientos no se observa un efecto de la temperatura sobre el índice de efectividad.

Con respecto a los tratamientos sometidos a 400 MPa (E y F), el tratamiento E, sometido a una menor temperatura, presenta un mayor IE, y conforme pasa el tiempo el IE del ambos se iguala y permanece constante hacia el término del proceso. Al final de la deshidratación los dos tratamientos presentan valores muy similares, pero no se aprecia un efecto de la temperatura sobre el IE.

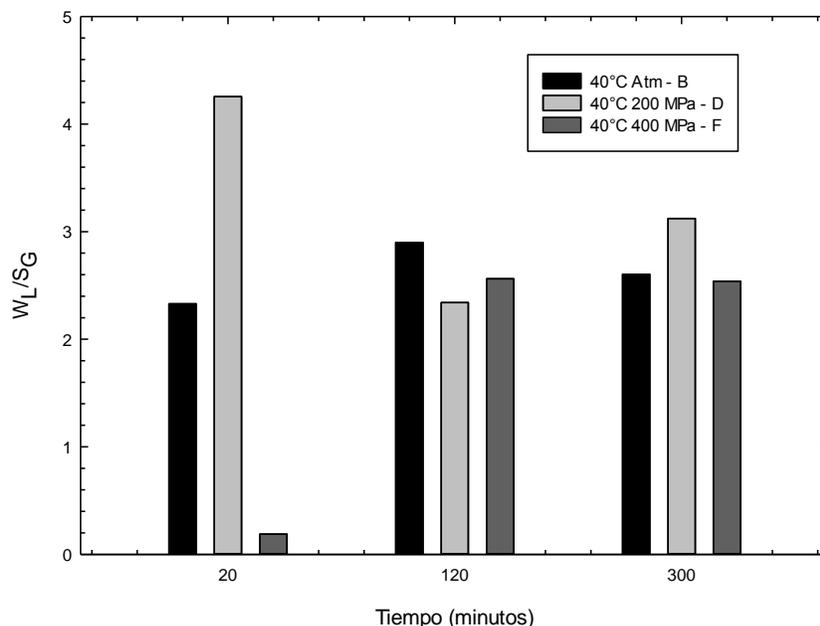


Figura 26. Índice de efectividad para diferentes tiempos en papaya maradol deshidratada osmóticamente en una disolución con 60 % de sacarosa a 40 °C y con tratamiento a diferentes presiones.

Efecto de la APH

Entre los tratamientos A, C y E, deshidratados a 30 °C, al inicio de la deshidratación los tratamientos con APH presentan un valor muy similar de IE, mayor que el tratamiento A. A los 180 min, los tres tratamientos aumentaron su IE, aunque A y E, lo incrementaron en menor medida que C, el cual, en esta etapa alcanzó su máximo IE. Al término de la deshidratación el IE del tratamiento C disminuyó, mientras que para A y E, IE aumentó. Sin embargo, estos valores no llegan a superar el valor de C. En este caso el tratamiento C, sometido a 200 MPa y 30 °C, fue el que presentó un mayor IE durante todo el proceso. En los tratamientos deshidratados a 40 °C, al inicio el tratamiento D presenta el mayor IE, seguido por B y por último F. A las dos horas de deshidratación prácticamente los tres tratamientos tienen valores de IE muy similares, mientras que al término del proceso, el tratamiento D presenta nuevamente el mayor IE, mientras que B y F presentan valores de IE muy similares, sin

observar algún efecto de la presión. Los valores de IE en la papaya fueron menores que en la manzana, posiblemente, por la diferencia en el tejido celular, dando como consecuencia un mayor daño del tejido por la APH en la papaya. Los tratamientos que alcanzaron un mayor IE fueron C y D, el primero 4.6032 a las dos horas de proceso y el segundo, 4.2551 al inicio del proceso.

6.5 Rapidez de transferencia de masa. k_{WL} y k_{SG}

Las constantes cinéticas k_{WL} y k_{SG} están relacionadas con las tasas de transferencia de masa asociadas con el mecanismo difusivo y osmótico (Fito y Chiralt, 1997). Estas constantes se obtuvieron de las gráficas $W_L/W_{L\infty}$ vs \sqrt{t} para la pérdida de agua, y $S_G/S_{G\infty}$ vs \sqrt{t} para la ganancia de sólidos, a partir de las pendientes que representan los valores de k_{WL} y k_{SG} , como se muestran en las ecuaciones 19 y 20. En las Tablas 12 y 13, se muestran los valores de k_{WL} y k_{SG} para manzana y papaya, respectivamente.

Tabla 12. Valores de k_{WL} y k_{SG} , y su respectivo coeficiente de correlación para manzana Chihuahua deshidratada osmóticamente.

T (°C)	Tratamiento	P (MPa)	k_{WL} (min ^{-1/2})	r^2	k_{SG} (min ^{-1/2})	r^2
30	A	Atm	0.0576	0.9945	0.0292	0.4872
	C	200	0.0560	0.8936	0.0560	0.8936
	E	400	0.0510	0.8711	0.0549	0.7250
40	B	Atm	0.0557	0.9836	0.0545	0.8704
	D	200	0.0539	0.9191	0.0659	0.8522
	F	400	0.0557	0.9169	0.0521	0.8005

Tabla 13. Parámetros cinéticos, k_{WL} y k_{SG} , y su respectivo coeficiente de correlación para papaya maradol deshidratada osmóticamente.

T (°C)	Tratamiento	P (MPa)	k_{WL} (min ^{-1/2})	r^2	k_{SG} (min ^{-1/2})	r^2
30	A	Atm	0.0633	0.9746	0.0561	0.9551
	C	200	0.0619	0.9410	0.0557	0.8160
	E	400	0.0647	0.9729	0.0576	0.9543
40	B	Atm	0.0602	0.9889	0.0596	0.9714
	D	200	0.0632	0.9627	0.0714	0.9027
	F	400	0.0652	0.9557	0.0650	0.9455

6.5.1 Manzana Chihuahua

En la Tabla 12, se muestran los valores de las constantes de rapidez para W_L y S_G , en manzana, así como su coeficiente de correlación (r^2). Las constantes de rapidez de pérdida de agua presentan valores cercanos a 0.05 en todos los tratamientos y sus coeficientes de correlación son cercanos a 1. Mientras que para las constantes de rapidez de ganancia de sólidos los tratamientos D y F presentan valores diferentes a 0.05.

Efecto de la APH sobre k_{WL}

Todos los tratamientos presentan valores que se aproximan a 0.05. En el caso de los tratamientos deshidratados a 30 °C, conforme aumentó la presión aplicada, k_{WL} disminuyó, por lo que se puede decir que tiene un comportamiento inversamente proporcional con respecto a la presión. Para los tratamientos B, D, y F, deshidratados a 40 °C, se observa un comportamiento diferente, ya que B y F, presentan casi el mismo valor de k_{WL} , aun cuando fueron sometidos a diferentes presiones, mientras que D presenta un menor valor de k_{WL} . Por lo tanto, en este caso no se aprecia un efecto causado por la presión aplicada sobre k_{WL} .

Efecto de la APH sobre k_{SG}

En A, C y E, no hay una tendencia clara de k_{SG} , al aumentar la presión hidrostática ya que el tratamiento con un mayor valor es C, sometido a 200 MPa, seguido por E, sometido a 400 MPa, y por último, contrario a lo mostrado para k_{WL} , el tratamiento A presentó el menor valor de k_{SG} . Para B, D y F, el tratamiento con mayor valor de k_{SG} , es D, es decir, el sometido a 200 MPa, seguido por B, sin APH, y por último F, sometido a 400 MPa, por lo que en este caso tampoco se observa un efecto claro de la presión sobre k_{SG} . En general todos los tratamientos presentan valores alrededor de 0.05 a excepción del tratamiento A, ya que presenta un r^2 de 0.4872.

Efecto de la temperatura sobre k_{WL}

Para A y B, sin APH, hay una relación inversamente proporcional entre el aumento de la temperatura y k_{WL} , ya que el tratamiento que obtuvo un mayor valor de k_{WL} fue A. En C y D, sometidos a 200 MPa, se observa la misma tendencia; una relación inversamente proporcional de la temperatura sobre k_{WL} , ya que C, deshidratado a 30°C, tuvo una mayor constante de transferencia de masa. Por último, en los tratamientos E y F, sometidos a 400 MPa, se observa una tendencia contraria, ya que al aumentar

la temperatura, hay un aumento en el valor de k_{WL} , ya que F, deshidratado a una mayor temperatura, fue el que tuvo un mayor k_{WL} . En términos generales los tratamientos con diferente temperatura de DO presentan valores cercanos a 0.05.

Efecto de la temperatura sobre k_{SG}

Entre los tratamientos A y B, hay una relación proporcional del aumento de la temperatura con el incremento de k_{SG} , ya que el tratamiento que obtuvo un mayor valor fue B, deshidratado a 40 °C, esto es contrario a lo observado para k_{WL} , sin embargo el coeficiente de correlación del tratamiento A es de 0.4872, por lo que no es muy confiable. Para C y D, se observa esta misma tendencia al aumentar la temperatura, hay un incremento de k_{SG} , ya que el tratamiento D tuvo el mayor valor en este parámetro. Esta tendencia cambia, al comparar E y F, sometidos a 400 MPa, ya que presentan una relación inversamente proporcional de la temperatura con el aumento de k_{SG} . El tratamiento E presenta un mayor valor de k_{SG} , que F deshidratado a mayor temperatura. El tratamiento que presentó un mayor k_{WL} , fue A, mientras que para k_{SG} , fue D. El índice de correlación de esta fruta en S_G , no es tan bueno como para papaya maradol, ya que este modelo no se ajustó adecuadamente con los datos experimentales. Esta diferencia probablemente se deba a la diferencia de tejidos entre una fruta y otra, ocasionando diferentes tasas de transferencia de masa entre ellas.

6.5.2 Papaya maradol

En la Tabla 13, se muestran los valores de las constantes cinéticas de rapidez para las placas de papaya deshidratadas osmóticamente, así como los coeficientes de correlación, para todos los tratamientos.

Efecto de la APH sobre k_{WL}

Todos los tratamientos presentan valores cercanos a 0.06, sin importar a qué condiciones fueron sometidos. En los tratamientos A, C y E, deshidratados a 30 °C; el E, sometido a una mayor presión, mostró el mayor valor de k_{WL} ($0.0647 \text{ min}^{-1/2}$), mientras que A, presentó un valor de $0.0633 \text{ min}^{-1/2}$, y por último C, con $0.0619 \text{ min}^{-1/2}$. Por lo tanto, en este caso el tratamiento que fue sometido a una mayor presión hidrostática, presentó un mayor valor de k_{WL} , sin embargo, no se muestra una tendencia clara con los tratamientos restantes. Los tratamientos B, D y F, deshidratados a 40 °C, muestran una tendencia ascendente con respecto a k_{WL} conforme aumenta la presión, ya que F presentó un mayor valor, seguido por D y por último, B el cual no fue sometido a APH. En este caso,

se observa un incremento de k_{WL} proporcional al aumento de la presión aplicada en la papaya maradol.

Efecto de la APH sobre k_{SG}

Las constantes de rapidez para ganancia de sólidos presentan valores cercanos a 0.055, con excepción de los tratamientos D y F. En los tratamientos A, C y E, deshidratados a 30 °C, E, sometido a 400 MPa, presentó el mayor valor de k_{SG} , seguido por A, y por último, C sometido a 200 MPa. En este caso, el mayor k_{SG} lo tuvo el tratamiento al que se le aplicó mayor presión, sin embargo, esta tendencia no se repite para C, sometido a 200 MPa, ya que este tratamiento quedó con el menor k_{SG} . En el caso de B, D y F, deshidratados a 40 °C, el tratamiento con mayor k_{SG} , fue D, seguido de F, sometido a 400 MPa, y por último, B sin APH. Los tratamientos con APH presentaron una mayor tasa de transferencia de solutos al interior de las placas de fruta, sin presentar una relación con la cantidad de presión aplicada.

Efecto de la temperatura sobre k_{WL}

En el caso de A y B, se observa un comportamiento inversamente proporcional entre el aumento de la temperatura de deshidratación y k_{WL} , ya que el tratamiento A, presentó un mayor valor. En C y D se observó una tendencia directamente proporcional de la temperatura con el aumento de k_{WL} , ya que D presentó un mayor valor. Por último, entre E y F, sometidos a 400 MPa, se observó una tendencia de aumento de k_{WL} con el aumento de la temperatura de deshidratación, ya que se obtuvo una mayor tasa de transferencia en la pérdida de agua para F.

Efecto de la temperatura sobre k_{SG}

En A y B se aprecia un efecto directamente proporcional entre el aumento de la temperatura y el aumento de k_{SG} , ya que B tuvo un mayor valor, contrario de lo observado para k_{WL} . En C y D también se presentó un aumento de k_{SG} con la temperatura de deshidratación, ya que D, presentó un mayor k_{SG} , que C. Para E y F, se observa la misma tendencia; el aumento de k_{SG} es proporcional al aumento de la temperatura de deshidratación. En todos los casos se observó un efecto de la temperatura sobre k_{SG} , ya que a mayor temperatura, hubo una mayor tasa de transferencia de masa de solutos hacia dentro de las placas de papaya maradol. El tratamiento que presentó un mayor k_{WL} fue F, mientras que para k_{SG} , fue D. El índice de correlación en casi todos los casos es superior a 0.9, por lo que se considera que este modelo se ajusta bien a los datos experimentales.

CONCLUSIONES

Con base en los objetivos previamente planteados y los resultados obtenidos se concluyó lo siguiente:

- 1) El efecto positivo de las APH se observa desde el inicio de la DO en los parámetros de humedad y sólidos secos, ya que los tratamientos con APH presentan menor contenido de humedad y mayor contenido de sólidos secos, manteniéndose esta tendencia a lo largo del proceso.

En el caso de los parámetros de pérdida de agua y ganancia de sólidos, los tratamientos sin APH, presentaron los mayores valores, mostrando un efecto directamente proporcional entre la temperatura y W_L . Los tratamientos con APH, presentaron valores más bajos en estos parámetros debido a que previamente ya han experimentado cierta transferencia de masa en ambos sentidos (ganancia de sólidos y pérdida de agua), la cual no se ve reflejada en la medición de estos dos parámetros. En general los tratamientos con APH presentaron un ligero aumento en la pérdida de agua con respecto a la cantidad de presión y temperatura aplicada, esto también sucede en el parámetro de S_G para las placas de papaya, pero para las placas de manzana se observa una disminución de S_G en el tratamiento sometido a mayor presión.

Al realizar el análisis estadístico se comprobó que la presión afecta significativamente a la pérdida de agua y a la ganancia de sólidos en las placas de ambas frutas, pero sólo existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos sin APH y los tratamientos con APH, y no entre los tratamientos con diferentes presiones hidrostáticas.

- 2) El efecto de la temperatura sobre el contenido de humedad y sólidos secos se observó al final del proceso en ambas frutas, concluyendo que a una mayor temperatura de deshidratación se obtiene una menor humedad y mayor contenido de sólidos secos. Para los parámetros de W_L y S_G , se observa que en la mayoría de los casos a mayor temperatura hay una mayor pérdida de agua; mientras que la ganancia de sólidos varía dependiendo de la fruta y el tratamiento de presiones.

- 3) Existe un efecto combinado de presión y temperatura, con el cual se logró obtener una menor humedad final y mayor contenido de sólidos, debido a que la combinación de estos dos factores favoreció la transferencia de masa. Esto se observa en el tratamiento F de ambas frutas, el cual fue sometido a 400 MPa y 40 °C, logrando disminuir 12 % (papaya) y 20 % (manzana) el contenido de humedad con respecto al tratamiento A, e incrementar 12 % (papaya) y 18 % (manzana) el contenido de sólidos secos con respecto al tratamiento A; logrando obtener alimentos con humedad intermedia. En los parámetros de W_L y S_G , no se observa este efecto combinado, lo mismo ocurre en el análisis

estadístico, el cual concluye que no existe alguna interacción entre la presión y la temperatura sobre la ganancia de sólidos y la pérdida de agua para las placas de las dos frutas.

4) El modelo de Peleg presentó un mejor ajuste para aquellos tratamientos que no fueron sometidos a APH, presentando valores de correlación por arriba de 0.9. En el caso de los tratamientos con APH este modelo no resulta el adecuado para predecir el contenido de W_L y S_G .

5) La cinética de deshidratación fue determinada por los siguientes parámetros: La tasa de deshidratación tiene su máximo valor al inicio del proceso en todos los casos, siendo los tratamientos sin APH los que presentan la mayor tasa debido a la mayor diferencia en el gradiente de concentración. No se observa un efecto causado por la APH sobre la tasa de deshidratación. Al aumentar la temperatura se observa que aumenta la tasa de deshidratación en todos los tratamientos de ambas frutas. Todos los tratamientos presentaron valores similares de D_e con orden de magnitud de 1×10^{-10} . Los valores de la difusividad efectiva obtenidos no presentan un efecto claro por la temperatura ni por la presión aplicada, esto puede deberse al modelo matemático utilizado para calcular dicho parámetro, ya que el modelo matemático de Crank solo se adapta para un mecanismo difusional, donde no contempla los cambios ocurridos previamente en las placas de fruta ocasionados por la aplicación de APH. El índice de efectividad se vio fuertemente afectado por la temperatura en aquellos tratamientos sin APH al final del proceso, observando que a mayor temperatura de deshidratación el IE aumentaba, esto ocurrió en ambas frutas. Para los tratamientos con APH, en las placas de manzana no es tan marcado este efecto de la temperatura, y en las placas de papaya no se observa. El efecto de la presión se observa al final del proceso de DO en las placas de manzana, mientras que en las de papaya no se observa un aumento significativo del IE debido al aumento de presión.

Los valores de las constantes cinéticas de rapidez son prácticamente iguales para todos los tratamientos en ambas frutas, con valores de 0.05 en la mayoría de los casos. El coeficiente de correlación es mayor para la constante de rapidez de pérdida de agua (k_{WL}) que para el de ganancia de sólidos (k_{SG}).

REFERENCIAS

AOAC, Official Methods of Analysis 18th Edition, 2005.

Ayala, A., & Giraldo, C. (2010). Cinéticas de deshidratación osmótica de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*). *Interiencia*, 35 (7), 540- 543.

Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering* 61, 291–295.

Azuara E., García, H., & Beristain, C. (1996). Effect of the centrifugal force on osmotic dehydration of potatoes and apples. *Food Research International* 29, 195-199.

Azuara, E., Beristain, C., & Gutiérrez, G. (2002). Osmotic dehydration of apples by immersion in concentrated sucrose/maltodextrin solutions. *Journal of Food Processing Preservation* 26, 295-306.

Badui, D. S. (2013). *Química de los Alimentos*, 1º Edición, Pearson Educación, 13-25.

Barat, J. (1998). Desarrollo de un modelo de la deshidratación osmótica como operación básica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Barbosa-Cánovas G., Pothakamury, U., Palou, E., & Swanson, B. (1998). Procesado de alimentos con alta presión. *Conservación no térmica de alimentos*. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, España, 9-48.

Barbosa-Cánovas G., & Vega-Mercado H. (2000). *Deshidratación de Alimentos*. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza, España.

Baugher, A. (2003). Anatomy and taxonomy. *Concise encyclopedia of temperate tree fruit*. Food Products Press, New York, 3-8.

Belitz, H. D. (2004). *Food Chemistry*, 3ª Edición, Springer, 842,843.

Beltrán, E., Pla, R., Yuste, J., & Mor-Mur, M. (2003). Lipid oxidation of pressurized and cooked chicken: Role of sodium chloride and mechanical processing on TBARS and hexanal values. *Meat Science* 64, 19-25.

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2006). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y Aplicaciones*, 4ª Edición, McGraw-Hill, 773-790.

Cheftel, J. (1991). Application des hautes pressions en technologie alimentaire. *Actualités des Industries Alimentaires et Agro-Alimentaire* 108, 141-153.

Cheftel, J. (1992). Effects of high hydrostatic pressure on food constituents: an overview. In C. Balny, R. Hayashi, K. Heremans, & P. Masson (Eds.), *High Pressure and Biotechnology* (pp. 195- 209). Colloque Inserm/John Libbey Eurotext.

Cheftel, J. (1995). Review: High pressure, microbial inactivation and food preservation. *Food Science and Technology international* 1, 75-90.

Cheftel, J., & Culliolli, J. (1997). Effect of high pressure on meat: a review. *Meat Science* 3, 211-236.

Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press. Oxford, UK.

CODEX STAN 184-1993: Norma del CODEX Alimentarius para la papaya. Food and Agriculture Organization, Italia, Roma, 2007.

Daoudi, L. (2004). Efecto de las altas presiones hidrostáticas sobre el gazpacho y zumo de uva. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

Falade K., & Igbeka J. (2007). Osmotic dehydration of tropical fruits and vegetables. *Food Reviews International* 23, 373-405.

Féito, D., & Portal, M. (2013). La competitividad en las exportaciones de papaya de México: un análisis cuantitativo. *Perspectivas* 7.

Fito, P., & Chiralt, A. (1997). Osmotic dehydration. An approach of the modelling of solid food liquid operations. *Food Engineering* 13, 231-252.

Gekko, K. (1992). The Sol-Gel Transition of food macromolecules under high pressure, *Food Hydrocolloids*, 259-264.

- Genina, P. (2002). Deshidratación osmótica: alternativa para conservación de frutas tropicales. *Avance y perspectiva* 21, 321-324.
- Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering* 58, 33-43.
- Grabowski, S., Marcotte, M., Poirier, M., & Kudra, T. (2002). Drying Characteristics of osmotically pretreated cranberries. Energy and quality aspects. *Drying Technology* 20(10), 1989-2004.
- Hayashi, R. (1989). Application of high pressure to food processing and preservation: philosophy and development. *Engineering and Food* 2, 815- 826.
- Heremans, K. (1995). High pressure effects on biomolecules. *High pressure Processing of Foods*, Ledward, D.E., Johnston, R. G., Earnshaw, and A. P. M., Hasting, Eds., Nottingham University Press, Nottingham, 81- 97.
- Herrero, A., & Romero, M. (2006). Innovaciones en el procesado de alimentos: Tecnologías no térmicas. *Revista Médica de la Universidad de Navarra* 5(4), 71-74.
- Kawamura, T. (1988). Method of Dehydrating Foods. US Patent No.4,788,072.
- Khoyi, M.R., & Hesari, J. (2007). Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78, 1355–1360.
- Kimura, K., Ida, M., Yosida, Y., Ohki, K., Fukumoto, T., & Sakui, N. (1994). Comparison of keeping quality between pressure-processed jam and heat-processed jam: changes in flavor components, hue, and nutrients during storage. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 58(8), 1386-1391.
- Knorr, D. (1993). Effects of high-hydrostatic-pressure processes on food safety and quality. *Food Technology* 47(6), 156- 161.
- Knorr, D. (2000). Process aspects of high-pressure treatment of food systems. Food preservation technology series. *Innovations in Food Processing*. Technomic Publishing CO. Inc., 2000, 13-31.

Lerici, C. (1985). Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. *Journal of Food Science* 50(1), 1217-1219.

Madamba, P., Lopez, R. (2002). Optimization of the osmotic dehydration of mango (*Mangifera indica* L.) slices. *Drying Technology* 20(6), 1227-1242.

Milind, P. (2011). Basketful benefits of papaya. *International Research Journal of Pharmacy* 2 (7), 6-12.

NMX-FF-041-SCFI-2007. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano fruta fresca papaya (*Carica papaya* L.). Especificaciones.

NMX-FF-061-SCFI-2003. Productos agrícolas no industrializados para consumo humano. Fruta fresca. Manzana (*Malus pumila* Mill), (*Malus domestica* Borkh). Especificaciones.

Núñez-Mancilla, Y. (2013). Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: Effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry. *Food Science and Technology* 52(2), 151-156.

Ochoa, C., & Ayala, A. (2005). Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *Ciencia y Tecnología* 4(5), 330-342.

Parjoko, K., Rahman, M., Buckle, K., & Perera, C. (1996). Osmotic Dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *Lebensmittel Wissenschaft und Technolgie* 29, 452-459.

Park, K., Bin, A., Brod, F., & Park, T. (2002). Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou. *Journal of Food Engineering* 52, 293-298.

Pothakamury, U., Barbosa-Cánovas, G., & Swanson, B. (1995). The pressure builds for better food processing. *Chemical Engineering Progress*, March, 45-53.

Rastogi, N., & Raghavarao, K. (1996). Kinetics of Osmotic Dehydration under Vacuum. *Lebensmittel Wissenschaft und Technolgie* 29, 669-672.

Rastogi, N., & Niranjana, K. (1998). Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *Journal of Food Science* 63, 3-5.

Rastogi, N., & Raghavarao, K. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science and Technology* 13(2), 48-59.

Rodríguez, A., Cunha, R., & Hubinger, M. (2003). Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. *Journal of Food Engineering* 59, 129-135.

Sablani, S., & Rahman, M. (2003). Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International* 36, 65-71.

SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (1999). Papaya y Maíz. *Revista Claridades Agropecuarias*, 67.

SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON), última actualización: diciembre, 2015.

San Martín M., & Barbosa-Cánovas G. (2002). Food processing by high hydrostatic pressure. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 42, 627-645.

Sangronis E., Pothakamury, U., Ramos, A., & Barbosa-Cánovas G. (1997). La alta presión hidrostática: una alternativa en el procesamiento no térmico de alimentos. *Alimentaria* 35, 33-43.

Saputra, D. (2001). Osmotic dehydration of pineapple. *Drying Technology* 19(2), 415-425.

Shi, J., & Le Maguer, M. (2002 a). Analogical cellular structure changes in solid-liquid contacting operations. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 35, 444-451.

Shi, J., & Le Maguer, M. (2002 b). Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects. *Food Reviews International* 18(4), 305-335.

Silveira, E.T.F., Rahman, M.S. & Buckle, K.A. (1996). Osmotic dehydration of pineapple: Kinetics and product quality. *Food Research International* 29, 227-233.

Smelt, J. (1998). Recent advances in the microbiology of high pressure processing. *Trends in Food Science & Technology* 9, 152-158.

Simal, S., Benedito, J., & Rossello, C. (1999). Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering* 36, 323-336.

Téllez, L., Ramírez, J., & Pérez, C. (2001). Aplicación de la alta presión hidrostática en la conservación de los alimentos. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 3(2), 66-80.

Torreggiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food research International* 26, 56-68.

Waliszewski, K., Delgado, J., & García, M. (2002). Equilibrium concentration and water and sucrose diffusivity in osmotic dehydration of pineapple slabs. *Drying Technology* 20(2), 527-538.

Yucel, U., Alpas, H., & Bayindirli, A. (2010). Evaluation of high pressure pretreatment for enhancing the drying rates of carrot, apple, and green bean. *Journal of Food Engineering* 98, 266-272.

Páginas electrónicas

FAO stat. (2013). Visitado en: Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. Recuperado de: <http://faostat3.fao.org/home/E>. Última vez consultado: 1 de marzo del 2017.

National Nutrient Database for standard reference. USDA. (2015). Visitado en: United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Recuperado de: <http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/2171?fgcd=Fruits+and+Fruit+Juices&manu=&facet=&format=&count=&max=35&offset=&sort=&qlookup=apple>. Última vez consultado: 1 de marzo del 2017.

Tecnología HPP. (2012). Visitado en: Hiperbaric High Pressure Processing. Recuperado de: <http://www.hiperbaric.com/es/alta-presion>. Última vez consultado: 2 de febrero del 2017.

ANEXOS

Índice de Anexo 1

- Figura A.1. Pérdida de agua para el tratamiento A de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.2. Pérdida de agua para el tratamiento B de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.3. Pérdida de agua para el tratamiento C de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.4. Pérdida de agua para el tratamiento D de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.5. Pérdida de agua para el tratamiento E de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.6. Pérdida de agua para el tratamiento F de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.7. Ganancia de sólidos para el tratamiento A de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).
- Figura A.8. Ganancia de sólidos para el tratamiento B de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).
- Figura A.9. Ganancia de sólidos para el tratamiento C de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).
- Figura A.10. Ganancia de sólidos para el tratamiento D de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

- Figura A.11. Ganancia de sólidos para el tratamiento E de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).
- Figura A.12. Ganancia de sólidos para el tratamiento F de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).
- Figura A.13. Pérdida de agua para el tratamiento A de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.14. Pérdida de agua para el tratamiento B de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.15. Pérdida de agua para el tratamiento C de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.16. Pérdida de agua para el tratamiento D de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.17. Pérdida de agua para el tratamiento E de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.18. Pérdida de agua para el tratamiento F de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).
- Figura A.19. Ganancia de sólidos para el tratamiento A de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).
- Figura A.20. Ganancia de sólidos para el tratamiento B de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).
- Figura A.21. Ganancia de sólidos para el tratamiento C de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

Figura A.22. Ganancia de sólidos para el tratamiento D de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

Figura A.23. Ganancia de sólidos para el tratamiento E de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

Figura A.24. Ganancia de sólidos para el tratamiento F de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

Índice de Anexo 2

Tabla A.1. Análisis de varianza bifactorial, para pérdida de humedad en placas de manzana Chihuahua al término de la deshidratación osmótica.

Tabla A.2. Análisis de varianza bifactorial, para ganancia de sólidos en placas de manzana Chihuahua al término de la deshidratación osmótica.

Tabla A.3. Análisis de varianza bifactorial, para pérdida de agua en placas de papaya maradol al término de la deshidratación osmótica.

Tabla A.4. Análisis de varianza bifactorial, para ganancia de sólidos en placas de papaya maradol al término de la deshidratación osmótica.

Tabla A.5. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la pérdida de agua en placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente

Tabla A.6. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la ganancia de sólidos en placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente

Tabla A.7. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la pérdida de agua en placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente

Tabla A.8. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la ganancia de sólidos en placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente.

Anexo 1

Modelo de Peleg

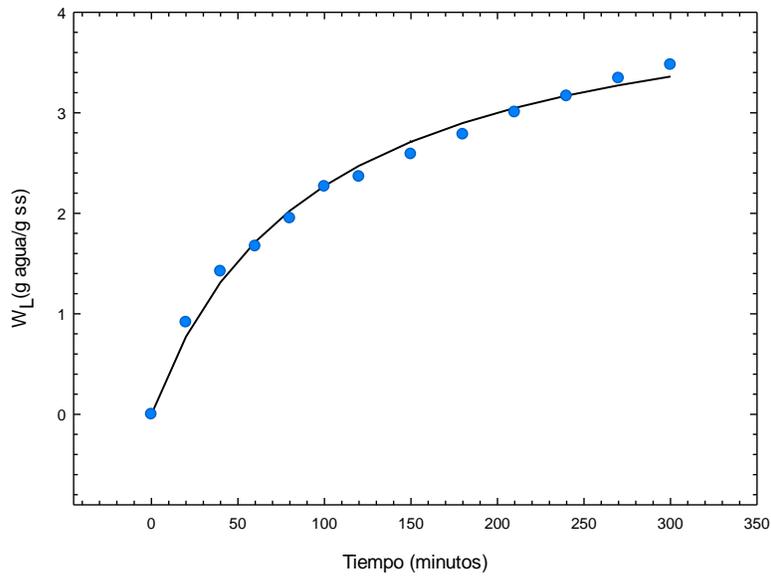


Figura A.1. Pérdida de agua para el tratamiento A de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

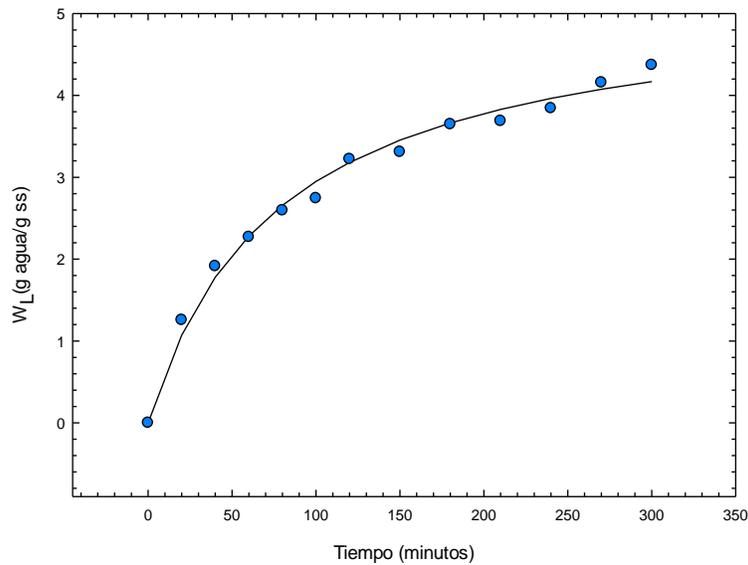


Figura A.2. Pérdida de agua para el tratamiento B de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

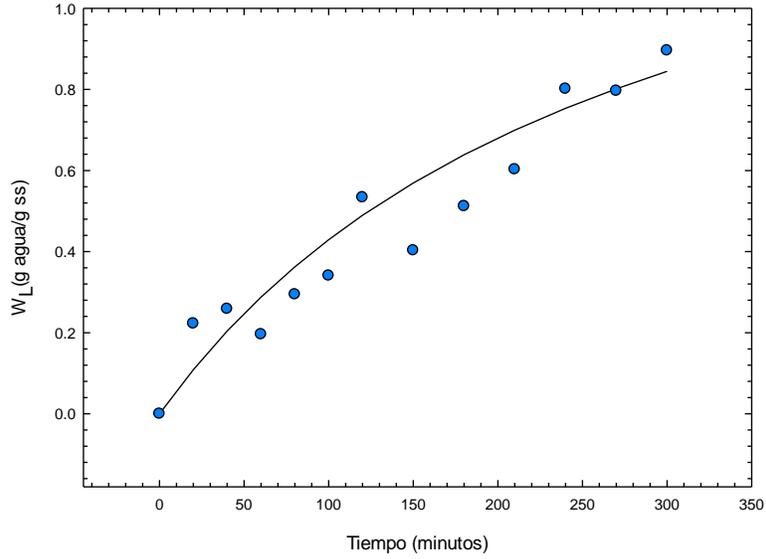


Figura A.3. Pérdida de agua para el tratamiento C de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

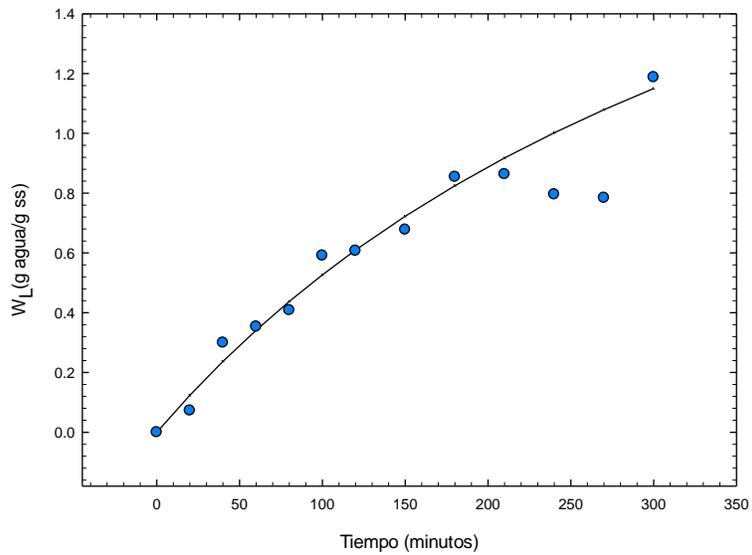


Figura A.4. Pérdida de agua para el tratamiento D de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

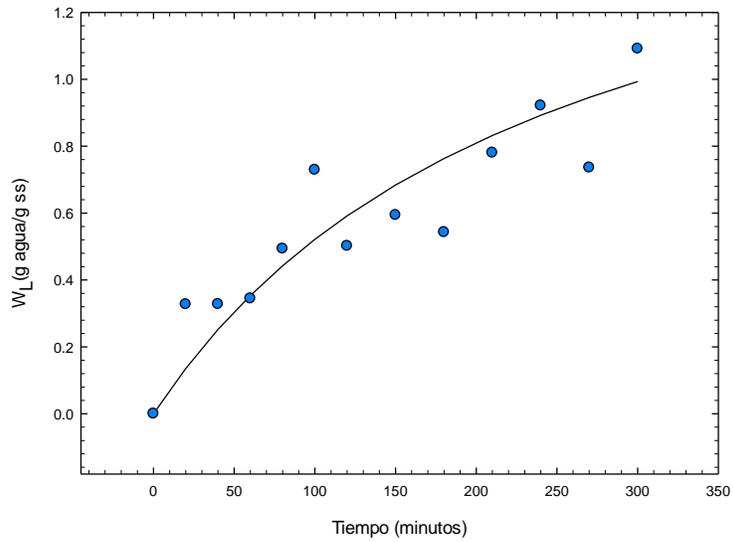


Figura A.5. Pérdida de agua para el tratamiento E de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

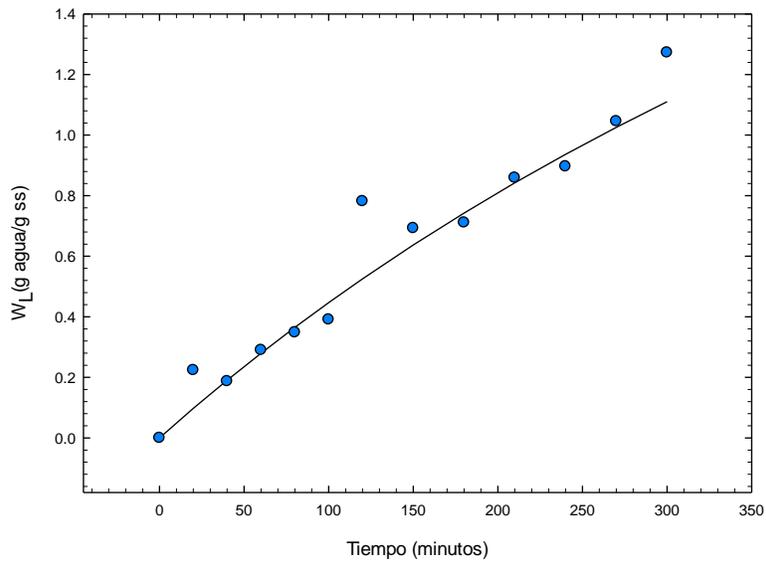


Figura A.6. Pérdida de agua para el tratamiento F de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

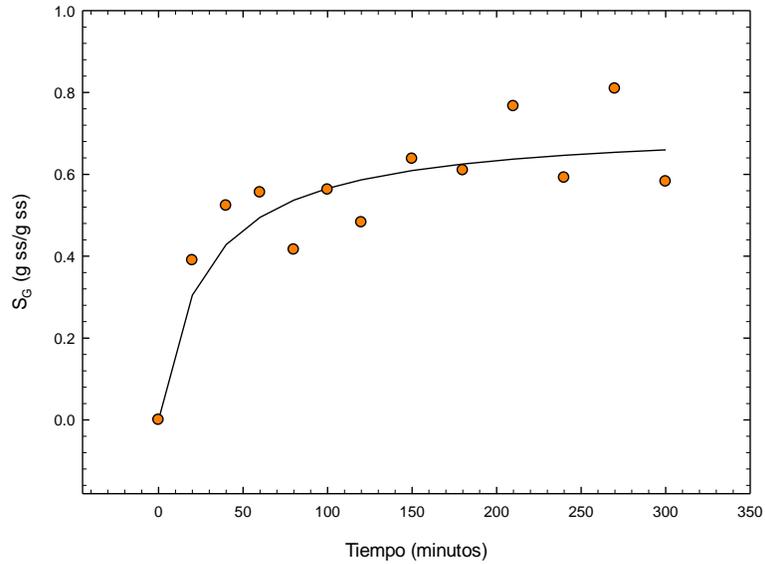


Figura A.7. Ganancia de sólidos para el tratamiento A de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

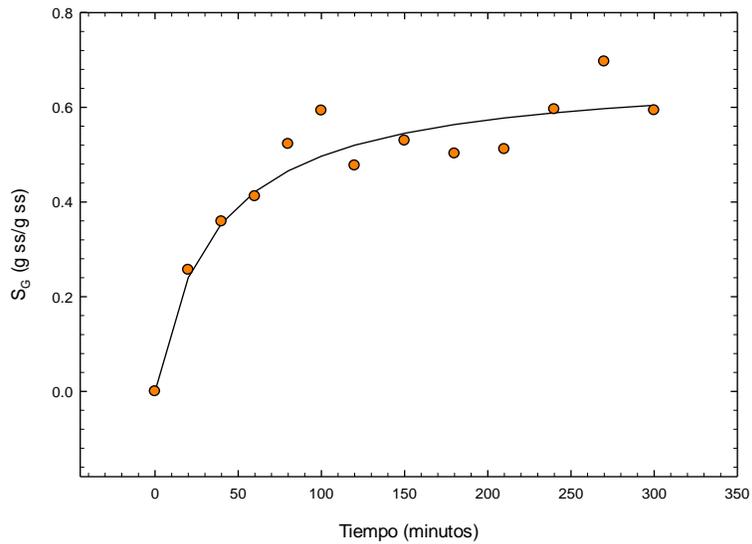


Figura A.8. Ganancia de sólidos para el tratamiento B de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

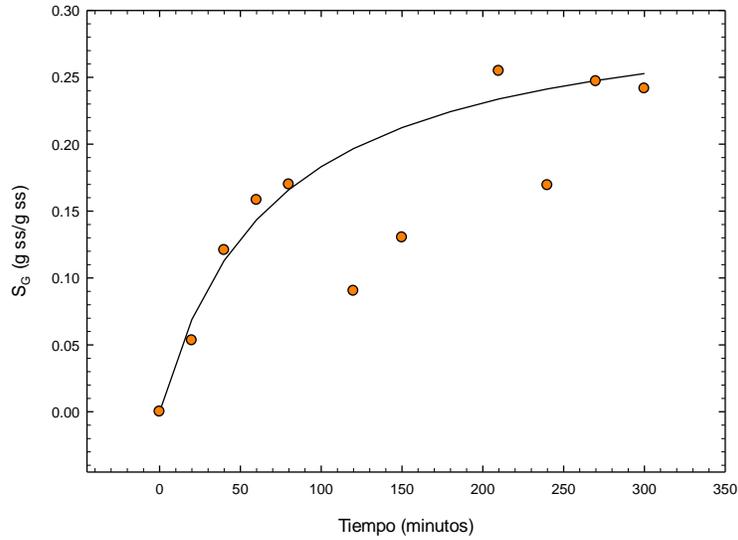


Figura A.9. Ganancia de sólidos para el tratamiento C de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

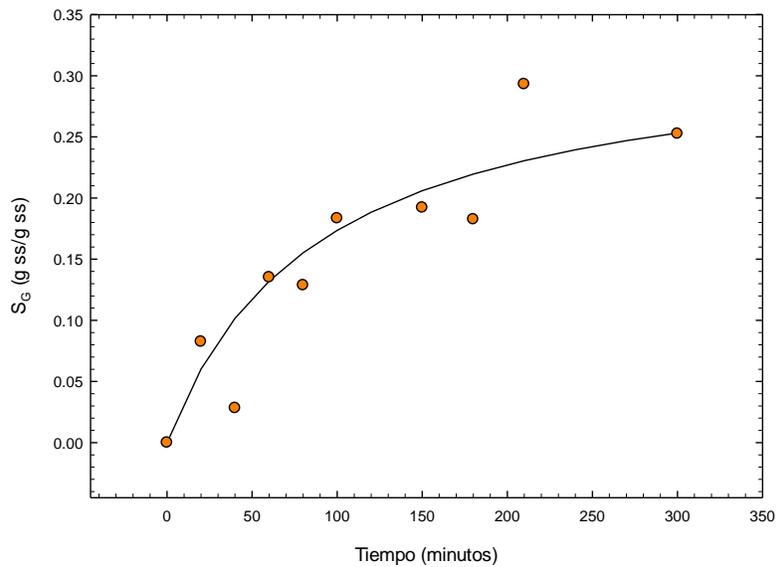


Figura A.10. Ganancia de sólidos para el tratamiento D de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

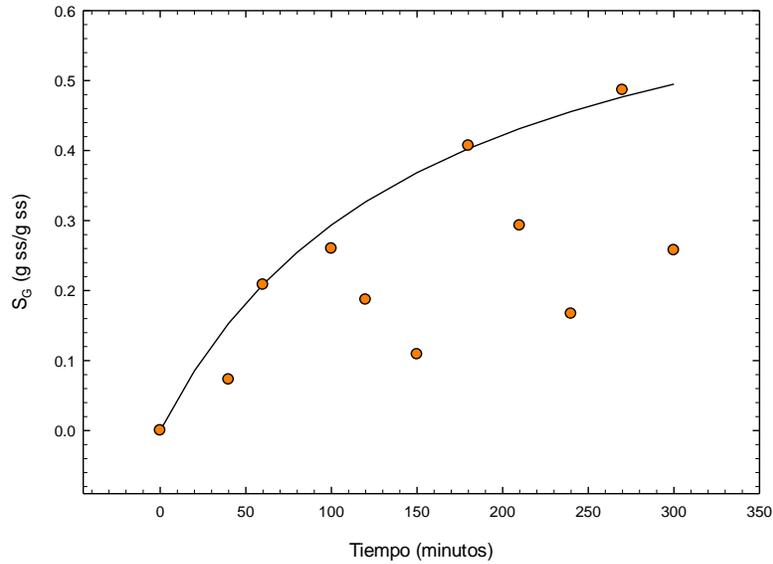


Figura A.11. Ganancia de sólidos para el tratamiento E de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

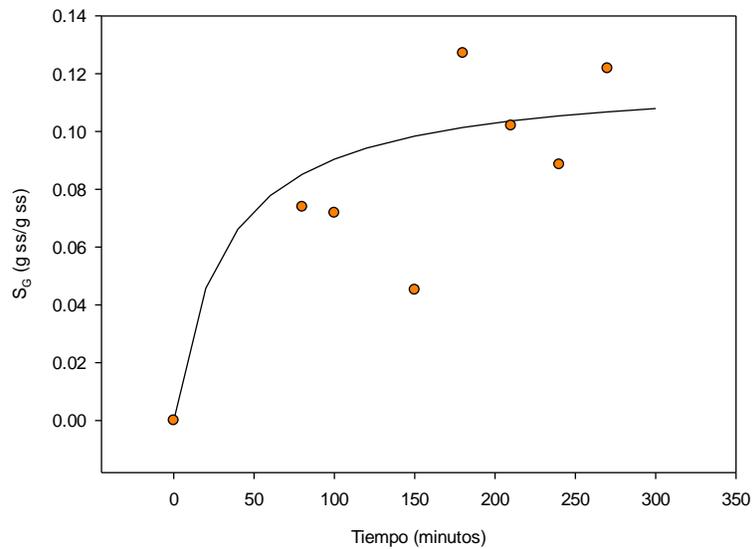


Figura A.12. Ganancia de sólidos para el tratamiento F de las placas de manzana Chihuahua, deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

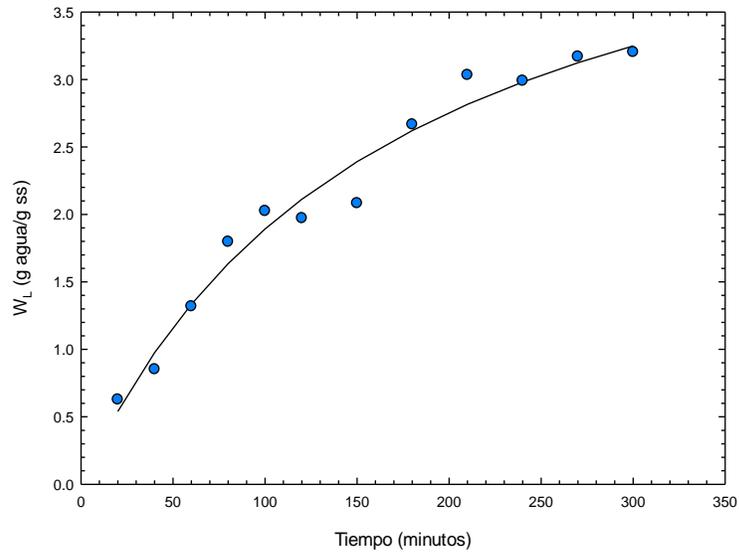


Figura A.13. Pérdida de agua para el tratamiento A de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

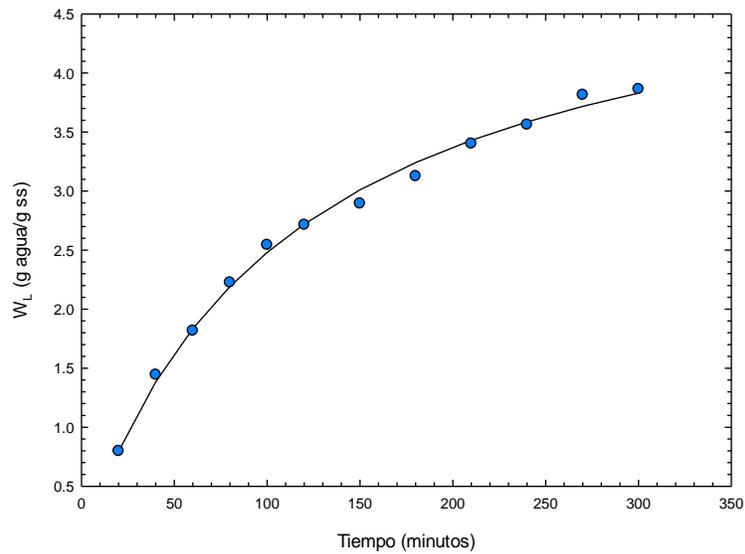


Figura A.14. Pérdida de agua para el tratamiento B de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

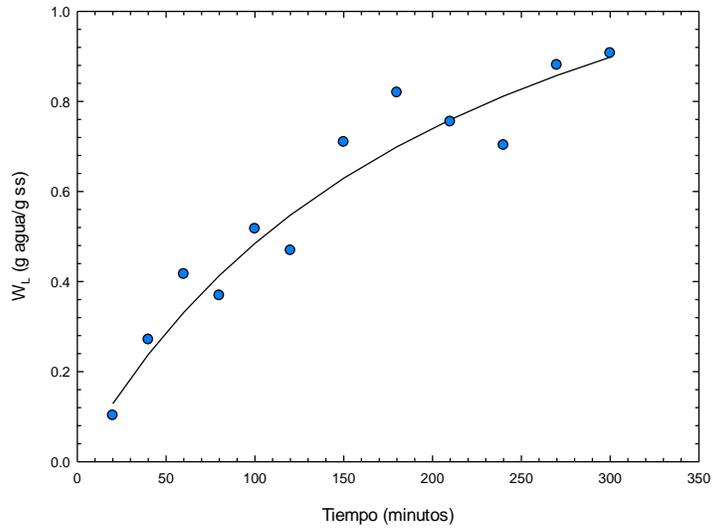


Figura A.15. Pérdida de agua para el tratamiento C de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

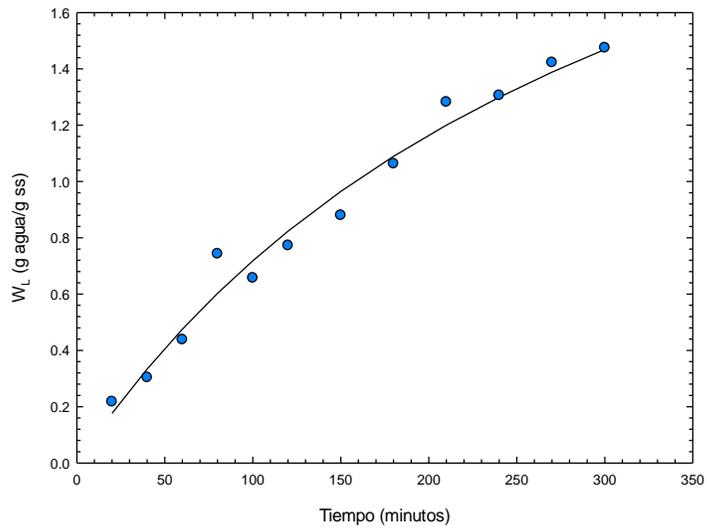


Figura A.16. Pérdida de agua para el tratamiento D de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

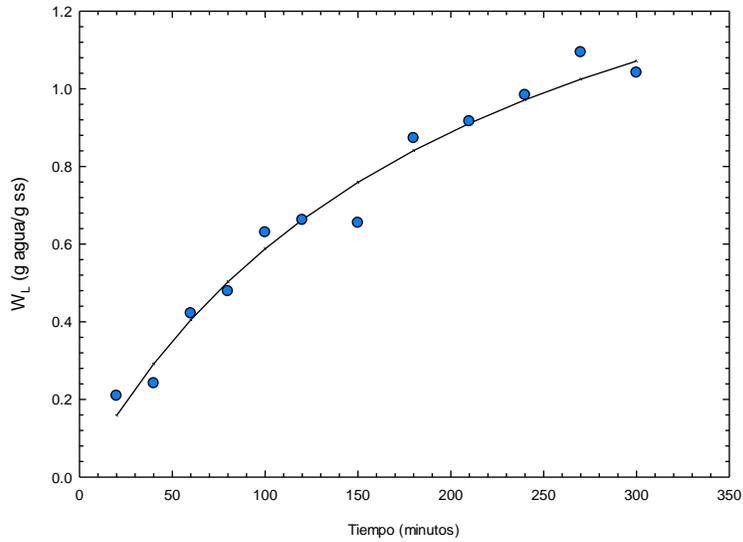


Figura A.17. Pérdida de agua para el tratamiento E de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

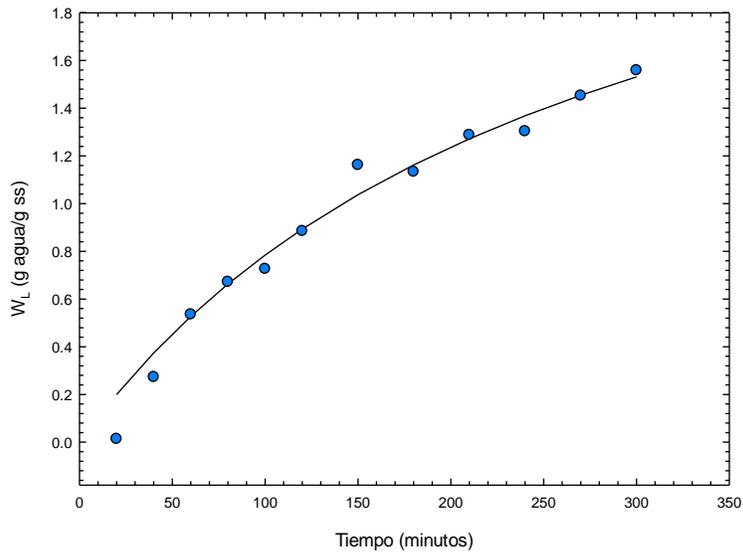


Figura A.18. Pérdida de agua para el tratamiento F de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para W_L (círculos).

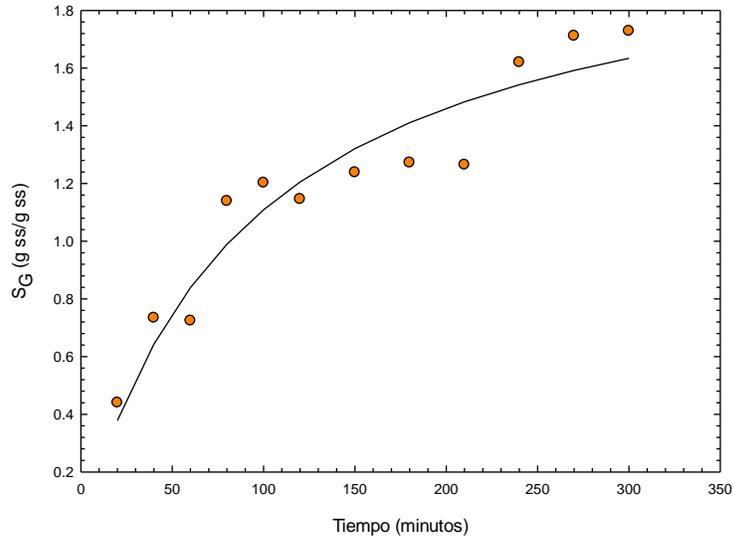


Figura A.19. Ganancia de sólidos para el tratamiento A de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

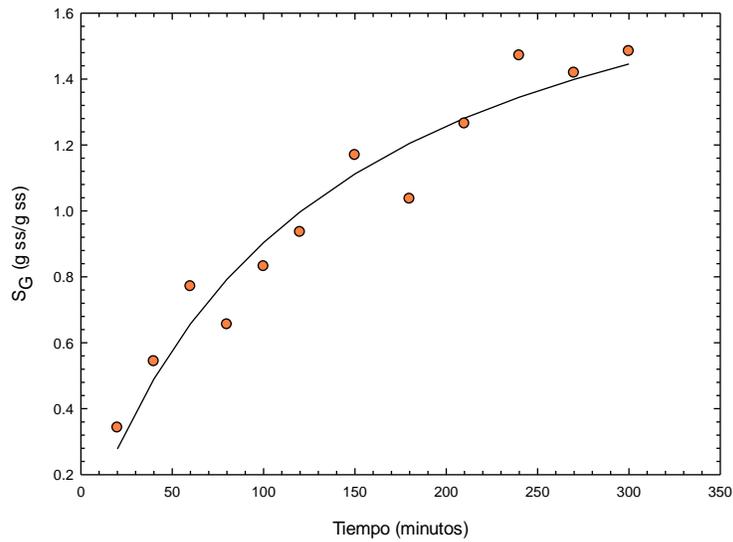


Figura A.20. Ganancia de sólidos para el tratamiento B de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y presión atmosférica. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

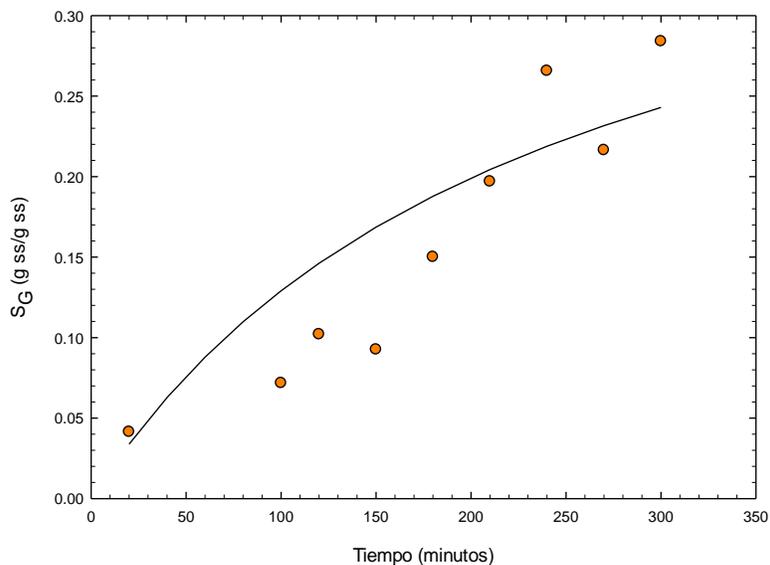


Figura A.21. Ganancia de sólidos para el tratamiento C de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

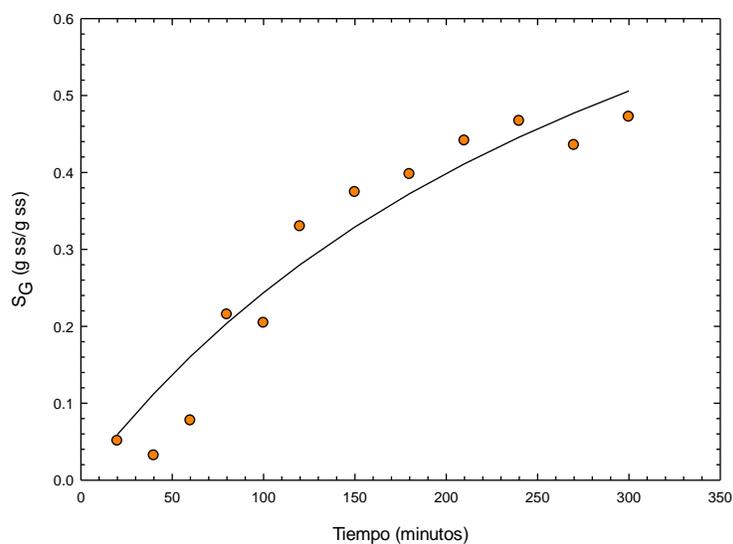


Figura A.22. Ganancia de sólidos para el tratamiento D de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 200 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

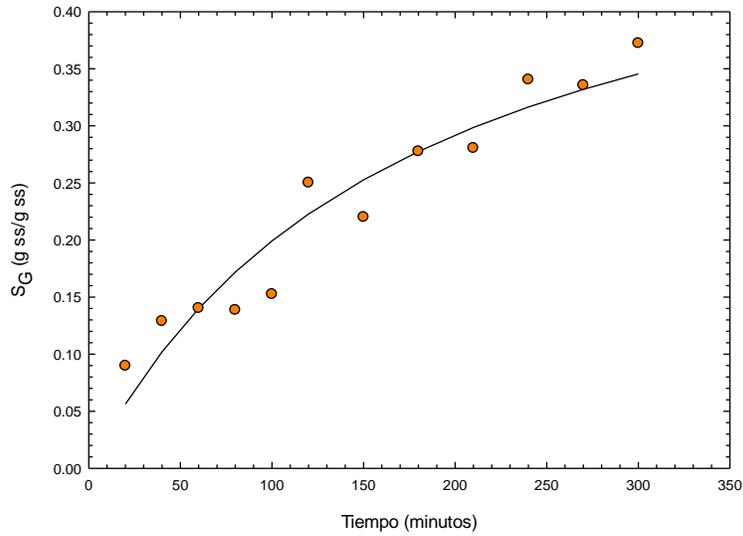


Figura A.23. Ganancia de sólidos para el tratamiento E de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 30 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

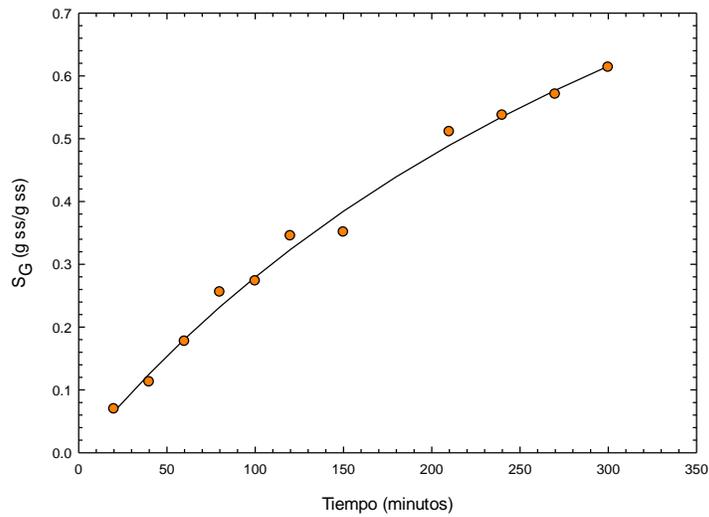


Figura A.24. Ganancia de sólidos para el tratamiento F de las placas de papaya maradol deshidratada osmóticamente en 60 % de sacarosa a 40 °C y 400 MPa. Modelo de Peleg (línea continua), datos experimentales para S_G (círculos).

ANEXO 2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Análisis de Varianza y método de Tukey

Análisis de varianza bifactorial

Para determinar si estadísticamente la temperatura, la presión o el conjunto de estas afecta a la pérdida de agua y a la ganancia de sólidos final, se realizaron dos análisis de varianza bifactorial para cada tipo de fruta, uno para la pérdida de agua (W_L) y otro para la ganancia de sólidos (S_G), con un $\alpha = 0.05$ %. El planteamiento de la hipótesis para la interacción de los factores (temperatura y presión) sobre los parámetros de W_L y S_G en las placas de los dos tipos de fruta es el siguiente

$$H_{0AB}: (\alpha\beta)_{11} = \dots = (\alpha\beta)_{ab} = 0$$

H_0 : no hay interacción entre los factores, es decir, los efectos de la temperatura sobre los parámetros de W_L o S_G no se ven afectados por la cantidad de presión aplicada a las placas de fruta.

H_1 : Hay interacción entre los factores, los efectos de la temperatura sobre los parámetros de W_L o S_G , se ven afectados por la presión aplicada a las placas de fruta.

El planteamiento de hipótesis para el efecto del factor A, es decir la temperatura, sobre los parámetros de W_L y S_G es el siguiente:

$$H_{0A}: \alpha_1 = \dots = \alpha_\alpha = 0$$

H_0 : La temperatura no afecta el valor de W_L o S_G final en las placas de fruta.

$$H_{1A}: \text{algún } \alpha_1 \neq 0$$

H_1 : La temperatura afecta el valor de W_L o S_G final en las placas de fruta.

El planteamiento de hipótesis para el efecto del factor B, es decir la presión, sobre los parámetros de W_L y S_G es el siguiente:

$$H_{0B}: \beta_1 = \dots = \beta_\alpha = 0$$

H_0 : La cantidad de presión aplicada no afecta el valor de W_L o S_G final en las placas de fruta.

$$H_{1AB}: \text{algún } (\alpha\beta)_{11} \neq 0$$

$$H_{1B}: \text{algún } \beta_1 \neq 0$$

H_i: La cantidad de presión aplicada afecta el valor de W_L o S_G final en las placas de fruta.

Los ANOVA para las placas de ambas frutas con respecto a la pérdida de agua y ganancia de sólidos, se muestran en las tablas siguientes.

Análisis de varianza para las placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente

En las Tablas A.1 y A.2 se muestran los ANOVA para W_L y S_G , respectivamente, para las placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente, tomando como factores la temperatura y la presión.

Tabla A.1. Análisis de varianza bifactorial, para pérdida de humedad en placas de manzana Chihuahua al término de la deshidratación osmótica.

Orígenes de las variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	F c
Temperatura	0.6226	1	0.6226	3.6001	0.1065	5.9874
Presión	21.1333	2	10.5667	61.1022	0.0001	5.1432
Interacción	0.2944	2	0.1472	0.8512	0.4727	5.1432
Error	1.0377	6	0.1729			
Total	23.0879	11				

Tabla A.2. Análisis de varianza bifactorial, para ganancia de sólidos en placas de manzana Chihuahua al término de la deshidratación osmótica.

Orígenes de las variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	F c
Temperatura	0.0025	1	0.0025	0.2176	0.6573	5.9874
Presión	0.3549	2	0.1774	15.2863	0.0044	5.1432
Interacción	0.0096	2	0.0048	0.4149	0.6779	5.1432
Error	0.0697	6	0.0116			
Total	0.4367	11				

De acuerdo con el análisis realizado para la pérdida de agua, se acepta la hipótesis nula en el caso de la interacción entre los factores, es decir, no existe alguna interacción entre la presión y la temperatura que afecte la pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de placas de manzana.

Con respecto al factor de temperatura, se acepta la hipótesis nula, es decir, la temperatura no afecta al contenido final de la pérdida de agua en las placas de manzana deshidratadas. En el caso de la presión, se acepta la hipótesis alterna, debido a que F es mayor que F_c , es decir, la presión afecta significativamente a la pérdida de agua en las placas de manzana al deshidratarlas osmóticamente.

De acuerdo con el análisis realizado para la ganancia de sólidos, se acepta la hipótesis nula en el caso de la interacción entre los factores, es decir, no existe alguna interacción entre la presión y la temperatura que afecte a la ganancia de sólidos en las placas de manzana durante la deshidratación osmótica.

Con respecto al factor de la temperatura, se acepta la hipótesis nula, es decir, la temperatura no afecta a la ganancia de sólidos final en las placas de manzana deshidratadas osmóticamente.

En el caso de la presión, se acepta la hipótesis alterna, debido a que F es mayor que F crítica, es decir, la presión afecta a la ganancia de sólidos en las placas de manzana deshidratadas osmóticamente.

Análisis de varianza para las placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente

En las Tablas A.3 y A.4 se muestran los ANOVA para W_L y S_G , respectivamente, para las placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente, tomando como factores la temperatura y la presión. De acuerdo con el análisis de varianza realizado, con respecto a la interacción entre los factores de temperatura y presión, se acepta la hipótesis nula, por lo que no existe alguna interacción entre estos dos factores que afecte el contenido final de la pérdida de agua en las placas de papaya maradol.

Con respecto a la temperatura, se acepta la hipótesis alterna, es decir, la temperatura afecta el contenido de la pérdida de agua en las placas de papaya deshidratadas osmóticamente.

Al analizar el factor de la presión, se acepta la hipótesis alterna, por lo que la presión afecta la pérdida de agua durante la deshidratación osmótica en las placas de papaya maradol.

Al realizar el análisis de varianza, se acepta la hipótesis nula para la interacción entre los factores, por lo tanto, no hay una interacción entre la presión y la temperatura que afecte el contenido de ganancia de sólidos en las placas de papaya maradol osmóticamente deshidratadas.

Con respecto al factor de la temperatura, se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, no hay efecto de la temperatura sobre la ganancia de sólidos en la deshidratación osmótica de las placas de fruta.

Al realizar el análisis, para el factor de la presión, se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que la presión aplicada afecta el contenido de sólidos ganados en las placas de papaya deshidratadas osmóticamente.

Tabla A.3. Análisis de varianza bifactorial, para pérdida de agua en placas de papaya maradol al término de la deshidratación osmótica.

Orígenes de las variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	F c
Temperatura	1.0158	1	1.0158	19.2211	0.0046	5.9873
Presión	13.9804	2	6.9902	132.2677	1.09E-05	5.1432
Interacción	0.0105	2	0.0052	0.0994	0.9068	5.1432
Error	0.3171	6	0.0528			
Total	15.3239	11				

Tabla A.4. Análisis de varianza bifactorial, para ganancia de sólidos en placas de papaya maradol al término de la deshidratación osmótica.

Orígenes de las variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	F c
Temperatura	0.0113	1	0.0114	0.4644	0.5210	5.9874
Presión	3.6836	2	1.8418	75.0506	5.68E-05	5.1432
Interacción	0.1420	2	0.0710	2.8948	0.1318	5.14325
Error	0.1472	6	0.0245			
Total	3.9844	11				

Método de Tukey para comparaciones múltiples

Para los tratamientos donde se encontró algún efecto estadísticamente significativo de alguno de los factores sobre los parámetros de W_L o S_G , se realizó el método de Tukey, con el objetivo de identificar las diferencias significativas entre las medias de los parámetros de W_L y S_G con respecto a los factores de temperatura o presión, utilizando la ecuación 21.

$$DMS_{Tukey} = Q_{\alpha, I, g, I} \sqrt{MCE / (N / I)} \quad (21)$$

Donde

N = número de observaciones

MCE = Cuadrado de la media del error

$Q_{\alpha, I, g, I}$ = donde el primer subíndice α , indica el nivel de confianza, el segundo subíndice I identifica el número de niveles que se están comparando y g.I, se refiere al número de grados de libertad en cuanto al error.

Valor de Q:

Para el factor de la presión: $Q_{0.05, 3, 6} = 4.34$

Para el factor de la temperatura: $Q_{0.05, 2, 6} = 3.46$

Método de Tukey para las placas de manzana Chihuahua

Calculando DMS a partir de la ecuación 21, para el factor de presión sobre la pérdida de agua, se obtiene el valor de $DMS = 0.902403$. Calculando DMS, para el factor de presión, en ganancia de sólidos en placas de manzana Chihuahua, da como resultado el valor de $DMS = 0.233797$. Al observar las Tablas A.5 y A.6, se obtiene que sí hay diferencia significativa entre los tratamientos sometidos a 200 MPa y los tratamientos sin APH, así como entre los tratamientos sometidos a 400 MPa y los tratamientos sin APH, para los parámetros de W_L y S_G obtenidos para las placas de manzana.

Tabla A.5. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la pérdida de agua en placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente.

	Presión atmosférica	200 MPa	400 MPa
Presión atmosférica	0	2.8828	2.7422
200 MPa		0	-0.1406
400 MPa			0

Tabla A.6. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la ganancia de sólidos en placas de manzana Chihuahua deshidratadas osmóticamente.

	Presión atmosférica	200 MPa	400 MPa
Presión atmosférica	0	0.3408	0.3848
200 MPa		0	0.0441
400 MPa			0

Método de Tukey para las placas de papaya maradol

Calculando DMS a partir de la ecuación 21, para el factor de presión, en pérdida de agua en placas de papaya maradol, da como resultado el valor de $DMS = 0.49886$. Calculando DMS, para el factor de presión, en ganancia de sólidos en placas de papaya maradol, da como resultado el valor de $DMS = 0.339946$. Al observar las Tablas A.7 y A.8, se obtiene que, hay diferencia significativa entre los tratamientos sometidos a 200 MPa y los tratamientos sin APH, así como entre los tratamientos sometidos a 400 MPa y los tratamientos sin APH, para los parámetros de W_L y S_G calculados para las placas de papaya deshidratadas osmóticamente.

Tabla A.7. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la pérdida de agua en placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente.

	Presión atmosférica	200 MPa	400 MPa
Presión atmosférica	0	2.3424	2.2331
200 MPa		0	-0.1093
400 MPa			0

Tabla A.8. Análisis de Tukey para el factor de la presión sobre la ganancia de sólidos en placas de papaya maradol deshidratadas osmóticamente.

	Presión atmosférica	200 MPa	400 MPa
Presión atmosférica	0	1.2285	1.1136
200 MPa		0	-0.1149
400 MPa			0