



S.E.P. TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO de Tuxtepec

**"EVALUACIÓN DEL EFECTO COMBINADO DE DESHIDRATACIÓN
OSMÓTICA Y SECADO POR VENTANA REFRACTIVA SOBRE
LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BETABEL
(*Beta Vulgaris L.*)"**

TESIS

Para Obtener el título de:
MAESTRA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

PRESENTA

I.B.Q. CAROLINA CALDERÓN CHIU

DIRECTOR:

DR. ERASMO HERMAN Y LARA

CO-DIRECTOR:

DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO



MCA-2016/04

TUXTEPEC, OAXACA, JUNIO 2016

COMITE TUTORIAL

DR. ERASMO HERMAN Y LARA

DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO

DRA. ARACELI PÉREZ SILVA

DRA. CECILIA EUGENIA MARTÍNEZ SÁNCHEZ

SEP

TECNM

SNEST



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO COMBINADO DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y SECADO POR
VENTANA REFRACTIVA SOBRE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BETABEL (*Beta vulgaris* L.)”.**

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

PRESENTA:

I.B.Q. CAROLINA CALDERON CHIU

DIRECTOR:

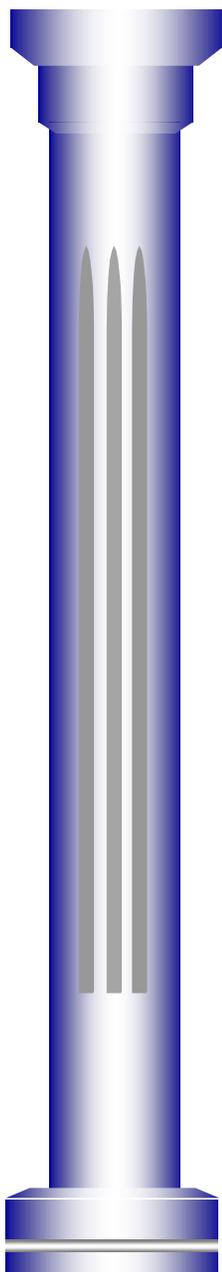
DR. ERASMO HERMAN Y LARA

CO-DIRECTOR:

DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO

TUXTEPEC, OAXACA

JUNIO 2016



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Tuxtepec

SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
División de Estudios Profesionales

Procedimiento para la Titulación
Autorización de Presentación del Trabajo Profesional
Referencia a la Norma ISO 9001:2008 7.5.1

SUBDIRECCION ACADÉMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
EXPEDIENTE: DEP-ñ/16

Tuxtepec, Oaxaca. **19/MAYO/2016**
OFICIO: No. 2382

C. CAROLINA CALDERÓN CHIU
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS
CON NÚMERO DE CONTROL M08350057
PRESENTE.

POR MEDIO DE LA PRESENTE ME PERMITO COMUNICARLE QUE LA COMISIÓN REVISORA INTEGRADA POR LOS C.C. **DR. ERASMO HERMAN Y LARA, DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO, DRA. ARACELI PÉREZ SILVA Y DRA. CECILIA EUGENIA MARTÍNEZ SÁNCHEZ** REVISÓ Y APROBÓ EN SU TOTALIDAD EL TRABAJO PROFESIONAL DENOMINADO **"EVALUACIÓN DEL EFECTO COMBINADO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y SECADO POR VENTANA REFRACTIVA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BETABEL (Beta vulgaris L)"** PRESENTADO POR USTED COMO PRODUCTO DE **TESIS** DEL LINEAMIENTO DE TITULACIÓN CORRESPONDIENTE, PARA OBTENER EL TÍTULO DE **MAESTRA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS**.

POR LO ANTERIOR Y DE ACUERDO A LOS LINEAMIENTOS INSTITUCIONALES, SE LE DA TRÁMITE LEGAL PARA QUE PROCEDA A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO PROFESIONAL.

ATENTAMENTE
"CIENCIA Y TÉCNICA PRESENTES AL FUTURO"


M.E. JULIAN KURI MAR
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES.

C.c.p.-Coord. de titulación
JKM/has



Av. Dr. Víctor Bra C.P. 68350 Col. 5 de Mayo, Tuxtepec, Oaxaca
Teléfono: (287) 87 5 10 44 Ext. 103, Fax: (287) 87 5 18 80
e-mail: info@ittux.edu.mx



REGISTRO SGC
Código ITTUX-AC-PO-008-09
Revisión: 1
Fecha de Autorización: 19/Junio/2014

“EVALUACIÓN DEL EFECTO COMBINADO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y SECADO POR VENTANA REFRACTIVA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BETABEL (*Beta vulgaris* L.)”.

Por:

I.B.Q. Carolina Calderón Chiu

Tesis propuesta al

Instituto Tecnológico de Tuxtepec

Como requisito parcial para obtener el grado de

Maestra en Ciencias en Alimentos

Mayo 2016

DEDICATORIA

A mis padres Ely y Conrado

A mis hermanos Vane, Jaz y Josué

Por su amor, comprensión y apoyo, los amo.

A mis mejores amigos Esbe, Karen e Irving

Por su cariño y amistad invaluable, los adoro.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor el Dr. Erasmo Herman Y Lara, no tengo forma de hacerle saber lo agradecida que estoy por toda la dedicación, las enseñanzas y el apoyo que me brindó para la realización de este trabajo de investigación, muchísimas gracias.

Al comité tutorial integrado por el Dr. Juan Gabriel Torruco Uco, la Dra. Araceli Pérez Silva y la Dra. Cecilia Eugenia Martínez Sánchez por la disposición, el interés y las recomendaciones realizadas para el mejoramiento de este proyecto de investigación.

A la Dra. Betsabé Hernández Santos y al Dr. Jesús Rodríguez Miranda, mi más sincero agradecimiento por su valiosa colaboración y el apoyo que me brindaron en la realización de este trabajo.

A mis compañeros de generación Gaby, Miguel y Madeleine, por los momentos y vivencias compartidas durante estos dos años, gracias por su amistad, en especial a ti Gaby porque te conozco de hace años y siempre he sentido tu cariño y apoyo, te aprecio mucho, gracias.

Al cuerpo académico de la maestría, a los compañeros que tuve el placer de conocer y con los que conviví, y en general a todos los que formaron parte de este logro, mil gracias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber financiado los estudios de Maestría en Ciencias en Alimentos en esta Institución.

RESUMEN

Calderón Chiu, Carolina. M. en C. Instituto Tecnológico de Tuxtepec, Mayo de 2016. "Evaluación del efecto combinado de deshidratación osmótica y secado por ventana refractiva sobre las propiedades físicas y químicas del betabel (*Beta vulgaris* L.)". Director: Dr. Erasmo Herman y Lara, co-director: Dr. Juan Gabriel Torruco Uco.

Los métodos convencionales de secado propician la pérdida de propiedades funcionales, nutritivas y físicas del producto. Actualmente, métodos alternativos minimizan estos daños mediante la combinación de tecnologías de secado, como la deshidratación osmótica (DO) y el secado por ventana refractiva (RW por sus siglas en inglés). En la actualidad no se conoce información acerca de la combinación DO-RW. Por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto combinado de DO-RW en algunas propiedades físicas y químicas del betabel como alimento modelo. Para ello se emplearon rodajas de 1 y 5 mm de espesor con 3.5 cm de diámetro. Se obtuvieron las cinéticas experimentales y simuladas de DO por el modelo de Page y la difusividad por el modelo de Fick, empleando soluciones de sacarosa de 35, 50 y 65%, a temperaturas de 30, 45 y 60 °C. Los mejores tratamientos elegidos en base a la mayor PA (pérdida de agua) y GS (ganancia de sólidos) finalizaron el proceso de secado en el RW a 60 y 85 °C. El producto obtenido fue evaluado en los parámetros de color (L^* , C^* , $^{\circ}h$ y ΔE), textura (análisis de perfil de textura por punción: PTP), se cuantificó el contenido de polifenoles totales (CPT), contenido de flavonoides totales (CFT) y la capacidad antioxidante (CA). Los resultados mostraron que las concentraciones de 50 y 65% de sacarosa a 45 y 60 °C presentaron mayor PA y GS en ambos espesores; con la disminución del espesor se mejoró la PA y GS, siendo adecuados los tratamientos de 1 mm para finalizar el proceso de secado en el secador RW. Los valores de De_a (difusividad de agua) oscilaron de 9.9385×10^{-08} a 3.0147×10^{-09} m^2/s , mientras que para De_s (difusividad de soluto) se obtuvieron de 4.6488×10^{-08} a 5.7513×10^{-11} m^2/s , tanto la De_a como la De_s disminuyeron con el aumento del espesor. Las rodajas de betabel

con pretratamiento de DO y secadas a 60 °C en el RW lograron la disminución del tiempo de secado con respecto al fresco en todas las concentraciones de sacarosa empleadas. En cuanto al color, la diferencia total de color (ΔE) en la DO, indicó que los tratamientos de 1 mm de espesor no mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo, mientras que en el efecto combinado DO-RW a 60 y 85 °C se mostró que los tratamientos a altas concentraciones y temperaturas, no mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo. La DO disminuyó la fuerza de punción un 46.77 y 70.03% en la rodajas de 1 y 5 mm de espesor respectivamente, en el efecto DO-RW las rodajas secadas a 60 °C no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo. La mejor retención CPT, CFT y CA durante la DO se presentó en todas las concentraciones a bajas temperaturas en ambos espesores, para la combinación DO-RW a 60 y 85 °C se presentó un incremento en el CPT, CFT y CA en todos los tratamientos de DO, los mejores resultados fueron obtenidos en todas las concentraciones de sacarosa a 30 y 45 °C. Finalmente, los mejores tratamientos del efecto DO-RW a 60 y 85 °C fueron obtenidos a 35, 50 y 65% de sacarosa a las temperaturas de 30 y 45 °C. La DO de rodajas de betabel con soluciones de sacarosa y una etapa final de secado en el RW puede ser empleada como un método de conservación aplicable a alimentos con características similares.

ABSTRACT

Calderon Chiu, Carolina. Master in Food Science. Instituto Tecnológico de Tuxtepec, May 2016. "Evaluation of the combined effect of osmotic dehydration and Refractance windows drying on the physical and chemical properties of beet (*Beta vulgaris* L.)". Advisor: Dr. Erasmo Herman-Lara, co-Advisor: Dr. Juan Gabriel Torruco-Uco.

Conventional drying methods favor the loss of functional, nutritional and physical properties of the product. Currently, alternative methods minimize this damage by combining drying technologies such as osmotic dehydration (OD) and refractance window drying (RW). At the present no information is known about the OD-RW combination. So the aim of this study was to evaluate the combined effect of OD-RW in some physical and chemical properties of beet as a model food. For this slices 1 and 5 mm thick, 3.5 cm diameter was used. Kinetics were obtained experimental and simulated OD by the Page's model and diffusivity model Fick using sucrose solutions of 35, 50 and 65% at temperatures of 30, 45 and 60 °C. Best treatments chosen based on the largest water loss (WL) and solid gain (SG) finished the drying process in the RW 60 and 85 °C. The product obtained was evaluated in color parameters (L^* , C^* , h° and ΔE), texture (Texture Profile Analysis by puncture: PTP), the total polyphenol content (TPC), total flavonoids content (TFC) and antioxidant capacity (AC) was quantified. The results showed that concentrations of 50 and 65% sucrose at 45 and 60 °C showed higher WL and SG in both thicknesses; with decreasing thickness WL and SG improved, being suitable treatments of 1 mm to complete the drying process in the dryer RW. De_a values (water diffusivity) ranged from 9.9385×10^{-08} a 3.0147×10^{-09} m^2/s , while for De_s (diffusivity solute) were obtained from 4.6488×10^{-08} a 5.7513×10^{-11} m^2/s , both De_a as De_s decrease with increasing thickness. Beet slices with pretreatment DO and dried at 60 °C in the RW achieved decrease drying time with respect to fresh at all concentrations of sucrose employed. As for color, the total color difference (ΔE) in the OD indicated that treatments of 1 mm thickness showed no significant difference ($p < 0.05$) compared with the control, while the combined effect OD-RW 60 and 85 °C showed that

treatments at high concentrations and temperatures showed no significant difference ($p < 0.05$) compared with the control. OD decreased puncture force a 46.77 and 70.03% in the slices 1 and 5 mm thickness respectively, in the OD-RW effect slices dried at 60 °C showed no significant difference ($p < 0.05$) compared with the control . The best retention TPC, TFC and AC during the OD was presented at all concentrations at low temperatures in both thicknesses, for OD-RW combination 60 and 85 °C an increase in the TPC, TFC and AC was presented in all OD treatments, the best results were obtained in all concentrations of sucrose at 30 and 45 °C. Finally, the best treatments DO-RW effect 60 and 85 °C were obtained at 35, 50 and 65% sucrose at temperatures of 30 and 45 °C. DO beet slices with sucrose solutions and a final drying step in the RW can be used as a method of preservation applicable to foods with similar characteristics.

CONTENIDO

	Pág.
Resumen	vi
Abstract	viii
Contenido	x
Lista de tablas	xiii
Lista de figuras	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Secado.....	4
2.1.1 Mecanismos de secado.....	4
2.2 Deshidratación osmótica (DO).....	6
2.2.1 Mecanismos de deshidratación osmótica.....	6
2.2.2 Modelación matemática de la DO.....	7
2.2.3 Efecto de los parámetros sobre la transferencia de masa y estructura.....	8
2.2.4 Aplicaciones de la DO.....	9
2.3 Secado por ventana refractiva®.....	10
2.3.1 Mecanismo de secado en el secador RW.....	10
2.3.2 Aplicaciones del secador RW.....	12
2.4 Betabel.....	13
2.4.1 Composición nutricional.....	14
2.5 Propiedades físicas de alimentos.....	16
2.5.1 Textura.....	16
2.5.1.1 Firmeza.....	17
2.5.2 Color.....	17
2.6 Propiedades químicas.....	18
2.6.1 Compuestos polifenólicos.....	18
2.6.1.1 Flavonoides.....	19
2.6.1.2 Ácidos fenólicos.....	20
2.6.2 Actividad antioxidante de polifenoles.....	21
2.7 Investigaciones científicas como antecedentes.....	22
2.8 Justificación.....	25
2.9 Objetivos.....	26
2.9.1 Objetivo General.....	26
2.9.2 Objetivos Específicos.....	26

III. MATERIALES Y MÉTODOS.	29
3.1 Caracterización y preparación de las muestras de betabel.....	30
3.2 Determinación de las cinéticas experimentales de DO para betabel.....	30
3.3 Predicción de cinéticas de PA y GS durante la DO.	32
3.4 Predicción de la difusividad efectiva durante la DO.	32
3.5 Acondicionamiento del secador RW.	33
3.6 Obtención de las cinéticas experimentales del secado por RW y DO-RW de betabel.....	34
3.7 Determinación de las propiedades físicas del betabel.	35
3.7.1 Determinación de color de rodajas de betabel.	35
3.7.2 Determinación del perfil de textura por punción	36
3.8 Determinación de las propiedades químicas del betabel.	37
3.8.1 Preparación de los extractos.	37
3.8.2 Determinación del contenido de polifenoles totales.....	37
3.8.3 Determinación del contenido de flavonoides totales.....	38
3.8.4 Determinación de capacidad antioxidante.	38
3.9 Análisis estadístico.....	39
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	41
4.1 Cinéticas experimentales y simuladas de DO para pérdida de agua con sacarosa al 35, 50 y 65 % en betabel fresco.	41
4.2 Cinéticas experimentales y simuladas de DO para ganancia de sólidos con sacarosa al 35, 50 y 65 % en betabel fresco.	45
4.3 Difusividad efectiva del agua y del soluto.	47
4.3.1 Difusividad efectiva del agua en la DO del betabel fresco empleando sacarosa al 35, 50 y 65%.....	48
4.3.2 Difusividad efectiva del sólido en la DO del betabel fresco empleando sacarosa al 35, 50 y 65%.....	50
4.4 Cinéticas de secado de betabel por RW	52
4.5 Cinéticas experimentales de secado combinado DO-RW de betabel fresco.....	55
4.6 Resultados de las propiedades físicas del betabel deshidratado osmóticamente, secado en RW y por efecto combinado DO-RW.	60
4.6.1 Resultados de color en el betabel deshidratado osmóticamente.....	60
4.6.2 Resultados de color en betabel secado por RW y por la combinación DO-RW.	64
4.6.3 Resultados de perfil de textura por punción (PTP) en betabel deshidratado osmóticamente.	68
4.6.4 Resultados de perfil de textura por punción (PTP) en betabel secado por RW y la combinación DO-RW.....	71

4.7 Resultados de las propiedades químicas del betabel sometido a DO, RW y DO-RW.	73
4.7.1 Resultados de contenido de polifenoles totales (CPT), contenido de flavonoides totales (CFT) y capacidad antioxidante (CA) en betabel deshidratado osmóticamente.....	74
4.7.2 Resultados del contenido de polifenoles totales (CPT), contenido de flavonoides totales (CFT) y capacidad antioxidante (CA) en betabel secado con RW y la combinación DO-RW.....	79
V. CONCLUSIONES.....	85
VI. REFERENCIAS.....	89

LISTA DE TABLAS.

Tabla No.	Descripción	Pág.
1	Composición proximal de 100 g de betabel fresco.	14
2	Composición fitoquímica del betabel	15
3	Condiciones experimentales para la obtención de cinéticas de DO en betabel fresco.	31
4	Condiciones experimentales para la obtención de cinéticas de RW y DO-RW en rodajas de 1 mm de espesor.	35
5	Coefficientes de difusividad efectiva de agua de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.	49
6	Coefficientes de difusividad efectiva de solutos de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.	51
7	Contenido de humedad de las rodajas de betabel al final de la DO de las rodajas de 1 mm de espesor.	56
8	Parámetros de color de rodajas de betabel de 1 y 5 mm de espesor pretratadas osmóticamente a diferentes concentraciones de sacarosa y temperaturas.	61
9	Parámetros de color de rodajas de betabel de 1 mm de espesor deshidratadas osmóticamente y secadas por RW a 60 y 85 °C	65

LISTA DE FIGURAS.

Figura No.	Descripción	Pág.
1	Fenómenos de transporte de masa durante la deshidratación osmótica.	7
2	Modos de transferencia de calor del baño de agua caliente al producto alimenticio en el secador RW.	11
3	Raíz de betabel.	13
4	Estructura básica de un flavonoide.	20
5	Estructura del ácido cafeico y clorogénico.	21
6	Desarrollo experimental del proyecto de investigación.	29
7	Secador RW adaptado a nivel laboratorio: a) Sin muestra y b) con muestra.	33
8	Equipos para la medición de propiedades físicas: a) Colorímetro UltraScan Vis y b) Texturómetro TA.XTPLUS	36
9	Espectrofotómetro Cary 60 UV Vis.	38
10	Cinéticas experimentales y simuladas de DO para pérdida de agua: a) 35, b) 50 y c) 65% de sacarosa a diferentes temperaturas y espesores.	43
11	Cinéticas experimentales y simuladas de DO para ganancia de sólidos: a) 35, b) 50 y c) 65% de sacarosa a diferentes temperaturas y espesores.	46
12	Cinéticas experimentales de secado por RW de betabel fresco a diferentes temperaturas.	53
13	Cinéticas experimentales de secado en RW a 60 y 85 °C de rodajas de betabel de 1 mm de espesor fresco con y sin pretratamiento de DO a diferentes concentraciones de sacarosa y temperaturas.	57

14	Resultados de PTP de rodajas de betabel osmóticamente deshidratadas a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.	70
15	Resultados de PTP de rodajas de betabel de 1 mm de espesor osmóticamente deshidratadas a diferentes concentraciones y temperaturas.	72
16	Resultados de CPT de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.	75
17	Resultados de CFT de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.	75
18	Resultados de CA del extracto de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.	76
19	Resultados de CPT de rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica con sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en el RW a 60 y 85 °C.	81
20	Resultados de CFT de rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica con sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en el RW a 60 y 85 °C.	81
21	Resultados de CA de los extractos de rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica con sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en el RW a 60 y 85 °C.	82

I. INTRODUCCIÓN.

La industria alimentaria utiliza la deshidratación como un método de conservación de gran número de productos, reduciendo su contenido de agua para prolongar la vida útil de los alimentos, evitando el crecimiento y proliferación de microorganismos. Sin embargo, el secado convencional al emplear altas temperaturas y tiempos de deshidratación prolongados causan la reducción en el valor nutricional afectando adversamente propiedades sensoriales, nutritivas, físicas, químicas, entre otras (Chauhan et al., 2011).

Así con la finalidad de remover parcialmente el contenido de agua de un producto alimenticio y reducir el tiempo de secado, comúnmente se realizan pretratamientos de estos productos agrícolas. Varios de estos pretratamientos se han descrito en la literatura y uno de ellos es la deshidratación osmótica (DO) (Yadav y Singh, 2012). Esta técnica de deshidratación es reconocida como un método económico de secado parcial de un alimento (Pereira da Silva et al., 2012), que consiste en la eliminación del agua de los tejidos de vegetales por la inmersión en una solución hipertónica (osmótica), basándose en el fenómeno natural y no destructivo de ósmosis a través de las membranas celulares (Rastogi et al., 2014), siendo efectiva incluso a temperatura ambiente y útil en la conservación del color, sabor y textura, mejorando las propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales de los alimentos (Kaymak-Ertekin y Sultanoglu, 2000). La DO ha sido empleada como pretratamiento al secado convectivo, liofilizado, secado al vacío y secado por microondas (Giannibertolo, 2004).

Por otro lado, la demanda de alimentos deshidratados de calidad estimula continuamente los esfuerzos hacia el desarrollo de métodos de secado mejorados e innovadores (Nindo et al., 2003a) que permitan llevar a cabo un proceso más rápido y efectivo, tal es el caso del secado por ventana refractiva (por sus siglas en inglés, RW). En este método de secado el material a secar en forma de pulpa, jugos o rodajas (frutas o vegetales) es colocado sobre una película plástica, la cual presenta características especiales de refracción (película de Mylar®), dicha película

flota sobre la superficie del agua caliente, de modo que la energía térmica para la evaporación de la humedad del alimento es transferida del agua caliente al material húmedo, principalmente por medio de la radiación infrarroja (Kudra y Mujumdar, 2009). El secado por RW se caracteriza por emplear temperaturas bajas en el producto, tiempos cortos y por la obtención de productos deshidratados de mejor calidad al final del proceso, además de presentar alta eficacia térmica y bajo costo energético (Nindo et al., 2007), siendo considerado un secador versátil con potencial para el procesamiento de productos nutraceuticos, farmacéuticos, biotecnológicos y químicos, así como en la recuperación y remediación en una amplia gama de industrias.

Actualmente no existe información sobre la combinación DO y RW por lo tanto en este trabajo se evaluó el efecto de la DO como pretratamiento al secado por RW en rodajas de betabel como alimento modelo, empleando solución de sacarosa en diferentes concentraciones y temperaturas, así como en diferentes espesores de betabel, evaluando las propiedades físicas (color y textura) y químicas (contenido de polifenoles totales, flavonoides totales y su capacidad antioxidante) de las rodajas al final del secado.

MARCO TEÓRICO

II. MARCO TEÓRICO.

2.1 SECADO.

El secado es una de las operaciones unitarias importantes en la manufactura de alimentos que tiene por objetivo reducir el contenido de humedad en productos alimenticios a niveles que aseguren su preservación por inhibición microbiana y actividad enzimática. En términos básicos, el proceso de secado (o deshidratación) involucra la eliminación de agua de un material alimenticio mediante la inducción de cambios de fase del agua de sólidos o líquidos en una fase de vapor por medio de la aplicación de calor (excepto la deshidratación osmótica, durante la cual el agua es removida sin un cambio de fase) (Sabarez, 2015).

2.1.1 MECANISMOS DE SECADO.

El proceso de secado de materiales alimenticios es extremadamente complejo, implica mecanismos transitorios acoplados de procesos de transferencia de calor, masa y momento, acompañados de transformaciones físicas, químicas y cambios de fase (Sabarez, 2012). En el secado de alimentos se producen simultáneamente dos mecanismos de transporte, el primero comprende la transferencia de calor de la fuente de calentamiento al material alimenticio y el segundo es el transporte de agua del interior del producto a su superficie, esta agua es transportada por aire (o por la aplicación de vacío para los secadores no convectivos). La energía térmica es requerida para generar un cambio de fase del agua (líquido a vapor) y activar el movimiento molecular. El aire caliente (medio más común) es empleado para suministrar calor (por convección) y como gas portador para eliminar la humedad del alimento. El calor también puede ser suministrado por conducción (por el calentamiento de superficies metálicas como fuente de calor) o por radiación,

igualmente puede ser proporcionado volumétricamente colocando el material húmedo en un campo electromagnético de microondas o radio frecuencia (Sabarez, 2015).

Sin embargo, la tecnología de secado ha evolucionado en lo referente al proceso y al consumo de energía, pasando de equipos de secado convencionales a la combinación de tecnologías de secado que conducen al mejoramiento de la calidad del producto final. Vega-Mercado et al. (2001) clasifican a las tecnologías de secado en cuatro generaciones de acuerdo a los avances técnicos que estos presentan. La primera generación incluye a los secadores de charolas y lecho (tales como secado en horno, cinta rotatoria y túnel), donde el aire caliente fluye a través de un área extensa del producto para eliminar el agua de la superficie. Estos secadores comprenden un alimentador, una fuente de calentamiento (con gas, eléctrica o un intercambiador de calor) y el colector del material seco. La disposición de estos componentes determina el tipo de secador y su aplicación en alimentos está orientada al secado de partículas sólidas o granulares. La segunda generación comprende a los secadores de pulverización y tambor, los cuales están destinados a secar suspensiones y purés de alimentos para convertirlos en polvo, aglomerados y escamas. En esta clasificación también se encuentran el secado por lecho fluidizado, en el cual se pueden secar piezas de alimentos de gran tamaño y granos.

En la tercera generación se incluyen los métodos de liofilización, secado al alto vacío y la deshidratación osmótica. La deshidratación osmótica y la liofilización son incluidos en la misma generación debido a que remueven el agua a baja temperatura, siendo empleados en la industria de alimentos para mantener la estructura y superar los deterioros de calidad en la deshidratación de frutas tropicales (Marques et al., 2009), mientras que en la cuarta generación se encuentran los últimos desarrollos tecnológicos, diferentes patentes de técnicas de secado con mayor capacidad, mejor calidad y control del producto, además con una reducción del impacto ambiental, operaciones más seguras, mayor eficacia y menor costo de inversión y funcionamiento, dentro de esta se encuentran el secado por microondas y radiofrecuencia, así como alternativas emergentes de secado como

la ventana refractiva (Nindo et al., 2007) y el secado por contacto de sorción (Barbosa-Cánovas y Uliano, 2004). Generalmente, el secado convencional consume una gran cantidad de energía e imparte alteraciones significativas en los atributos de calidad del producto debido a tiempos prolongados de secado y altas temperaturas (Mujumdar y Wu, 2010), es por ello que cobran vital importancia las nuevas tecnologías de secado enfocadas en la retención de estos atributos de calidad en productos alimenticios, tal es el caso de la deshidratación osmótica y el secado por ventana refractiva, que como se mencionó anteriormente mantienen la calidad final del producto seco comparada con otros secadores convencionales.

2.2 DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA (DO).

Esta técnica de deshidratación, es reconocida como un método económico de deshidratación parcial de un alimento (Da Silva et al., 2012), que consiste en la eliminación del agua de tejidos de vegetales por inmersión en una solución hipertónica (osmótica), donde la eliminación del agua se basa en el fenómeno natural y no destructivo de ósmosis a través de las membranas celulares (Rastogi et al., 2014). La fuerza impulsora para la difusión de agua del tejido hacia la solución osmótica es proporcionada por la alta presión osmótica de la solución hipertónica, la cual permite el ajuste de las propiedades físico-químicas de los alimentos mediante la reducción del contenido de agua y la incorporación simultánea de ingredientes o aditivos con propiedades preservativas o antioxidantes en el alimento (Krokida et al., 2000).

2.2.1 MECANISMOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA.

La transferencia de masa durante la DO ocurre a través de la membrana semipermeable del alimento, la cual ofrece resistencia dominante a este tipo de transferencia de masa. La diferencia de potencial osmótico del agua y soluto en el

sistema sólido-líquido (solución) resulta en tres principales flujos de transferencia de masa, el primero es el flujo de solutos de la solución hacia el alimento y el segundo es el flujo de agua del alimento hacia la solución osmótica, estos ocurren principalmente en las primeras 2 a 3 h de inmersión, después de ese tiempo, la diferencia de potencial osmótico entre el alimento y la solución osmótica disminuye gradualmente, hasta que el sistema alcanza el equilibrio dinámico (Shi y Le Maguer, 2002); un tercer flujo se presenta por la lixiviación de los solutos propios del alimento (como azúcares, ácidos orgánicos, minerales, vitaminas, entre otros (Cao et al., 2006), este tercer flujo es cuantitativamente despreciable en comparación con las primeras dos transferencias de masa (Mendoza y Schmalko, 2002; İspir y Türk, 2009). En la figura 1 se muestran los fenómenos de transporte de masa durante la deshidratación osmótica.

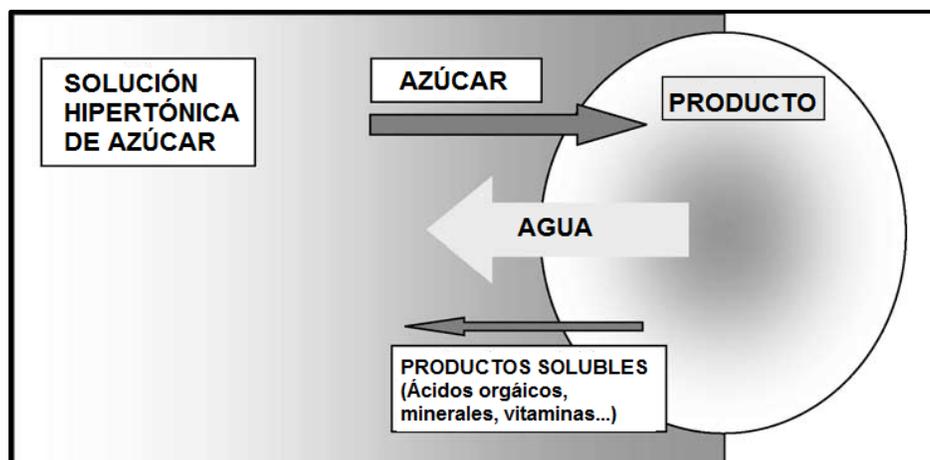


Figura 1. Fenómenos de transporte de masa durante la deshidratación osmótica (Sabarez, 2015).

2.2.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA DO.

El proceso de DO se caracteriza por periodos dinámicos y periodos de equilibrio, en el periodo dinámico, las velocidades de transferencia de masa varían hasta alcanzar el equilibrio donde la tasa neta de transporte de masa es cero. Entonces, para modelar el proceso osmótico, entender los mecanismos de transferencia de masa involucrados en el sistema y desarrollar los modelos teóricos para el cálculo de los

parámetros de proceso, se requiere estudiar el estado de equilibrio de los alimentos en la DO (Sablani y Rahman, 2003; Shi y Le Maguer, 2002). La alta complejidad del sistema hace que la precisión predictiva sea difícil cuando se usan modelos matemáticos rigurosos ya que depende de la determinación apropiada de las condiciones de equilibrio y de parámetros como la difusividad. Con el propósito de describir los fenómenos de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de los productos alimenticios muchos autores han utilizado modelos ya sea de manera empírica o mecanística (Íspir y Toğrul, 2009). La mayoría de los modelos mecanicistas o mecanísticos para la transferencia de masa durante la DO se basan en las soluciones analíticas (una solución en serie) de la segunda ley de Fick y en la suposición de que la difusión del agua y de los sólidos son procesos independientes, que el alimento es isotrópico y no se encoge; de los cuales la difusividad del agua y soluto pueden ser determinadas por medio de un análisis de regresión no lineal (Azarpazhooh y Ramaswamy, 2009).

2.2.3 EFECTO DE LOS PARÁMETROS SOBRE LA TRANSFERENCIA DE MASA Y ESTRUCTURA.

La selección de estos parámetros de proceso depende de la aplicación. Por consiguiente, es necesario encontrar el equilibrio entre estos parámetros a fin de que las tasas principales de transferencias de materia se adapten a las requeridas. La selección de un agente osmótico depende del costo, de su masa molar y de las características sensoriales del alimento a ser deshidratado. Los agentes osmóticos más comunes son el cloruro de sodio, sacarosa, lactosa, glicerol, etanol, alanina, entre otros depresores de la actividad de agua, siendo el azúcar de mesa (la sacarosa) y la sal común (cloruro de sodio) los agentes osmóticos más utilizados debido a su relativo bajo costo (Mandala et al., 2005) y contrario a los monosacáridos, ésta favorece la pérdida de agua en lugar de la ganancia de solutos (Devic et al., 2009). La velocidad de deshidratación aumenta con un incremento de la concentración y temperatura de la solución osmótica. La agitación asegura la

reducción o eliminación de la resistencia de transferencia de masa y proporciona una constante fuerza impulsora. Por otro lado, el tamaño de la muestra también es importante, muestras grandes se deshidratarán lentamente debido a que el área interfacial y la longitud de la trayectoria de difusión será mayor.

2.2.4 APLICACIONES DE LA DO.

La DO ha sido usada como un pretratamiento por muchos procesos para mejorar las propiedades funcionales, sensoriales y nutricionales de los alimentos sin cambios en su integridad, precediendo a procesos tales como la congelación, secado convectivo, liofilizado, secado al vacío y secado por microondas (Giannibertolo, 2004). De acuerdo con Yadav y Singh (2012), las ventajas de la DO son: la eliminación del agua a bajas temperaturas, minimiza la pérdida de color y sabor, hay mayor retención del flavor cuando se utiliza azúcar como agente osmótico, se previene el oscurecimiento oxidativo y enzimático; hay una reducción parcial del contenido de agua, disminuyendo así la cantidad de agua a eliminar por otro método de secado en tratamiento posterior, se presenta menor consumo de energía debido a que no se involucra un cambio de fase, la textura del producto es mejor después de la reconstitución, además de requerir equipos simples para llevarla a cabo.

Uno de los aspectos distintivos de la DO, cuando se compara con otros métodos de deshidratación es la formulación directa lograda a través de la incorporación selectiva de solutos sin modificar la integridad del alimento y gracias al equilibrio de los dos principales efectos (la pérdida de agua y absorción de sólidos), las propiedades funcionales pueden ser adaptables a diferentes sistemas alimenticios (Torregiani y Bertolo, 2001). Además, con el fin de hacer más atractiva la DO en términos económicos, la solución osmótica puede ser reconcentrada, ya sea por evaporación o por la adición de reactivo osmótico. Como ya se mencionó esta técnica es considerada una alternativa complementaria en el procesamiento térmico de alimentos, empleándose como pretratamiento a los diversos tipos de secado ya

mencionados. Sin embargo, el desarrollo de nuevos métodos combinados que utilicen la DO como pretratamiento a nuevas tecnologías de secado como el secado por ventana refractiva podría conservar la calidad final de ciertos productos alimenticios.

2.3 SECADO POR VENTANA REFRACTIVA®.

El secado por ventana refractiva (RW por sus siglas en inglés Refractance Windows™), fue patentado por Magoon (1986) y es un método de secado de productos sensibles al calor, creado originalmente para la obtención de productos secos a partir de alimentos líquidos y semilíquidos tales como purés de frutas y verduras (Bolland, 2000), convirtiéndolos en polvos, hojuelas y concentrados obteniendo productos con mejor calidad (Abonyi et al., 2002).

2.3.1 MECANISMO DE SECADO EN EL SECADOR RW.

En el secador RW el material a secar en forma de pulpa, jugos o rodajas (frutas o vegetales) es colocado sobre una película plástica que es transparente a la radiación infrarroja, esta película presenta características especiales de refracción (película de Mylar® hecha de Tereftalato de polietileno) y flota sobre la superficie del agua (baño de agua), la cual es calentada generalmente a pocos grados debajo del punto de ebullición (85-97 °C), manteniéndola constante para evitar la formación de burbujas que podrían reducir la transferencia de calor hacia el producto (Nindo et al., 2004). En esta tecnología se presentan los tres modos de transferencia de calor de acuerdo a la figura 2, por conducción (a través de la película plástica al producto), por convección (entre el agua y la película plástica y entre el producto y el aire) y por radiación (a través de la película al producto) (Ortiz-Jerez et al., 2015). La energía térmica del agua caliente es transferida a través de conducción y radiación en diferentes proporciones dependiendo de la resistencia que ofrecen estos

mecanismos de transferencia de calor (Nindo y Tang, 2007), esta energía térmica se transfiere del agua caliente al material húmedo principalmente por medio de la radiación infrarroja (Kudra y Mujumdar, 2009) y gracias a que la película es muy delgada (aproximadamente 0.2 mm) el equilibrio térmico es alcanzado casi inmediatamente con el agua de proceso.



Figura 2. Modos de transferencia de calor del baño de agua caliente al producto alimenticio en el secador RW (Ortiz-Jerez et al., 2015).

La película plástica permite la transmisión de energía infrarroja con longitudes de onda que coinciden con los espectros de absorción de las moléculas de agua en los alimentos, esta transmisión de energía infrarroja es importante debido a que asegura la rápida evaporación a baja temperatura (Nindo et al., 2007). Cuando el alimento húmedo es colocado en la película, se crea una ventana que deja pasar la radiación térmica del agua caliente en toda la superficie donde el material húmedo está colocado, dicha ventana se cierra gradualmente a medida que el material se seca, cortando la radiación térmica y evitando que la muestra alcance la temperatura del baño (Ortiz-Jerez et al., 2015), dejando a la conducción como modo predominante de transmisión de calor y puesto que la película plástica es débil conductora de calor, se reduce el riesgo de recalentamiento del producto debido a que el calor transferido por conducción al material es mínimo.

2.3.2 APLICACIONES DEL SECADOR RW.

La técnica ha sido usada para el secado de productos farmacéuticos, nutracéuticos y pigmentos cosméticos (Ortiz-Jerez et al., 2015) y a diferencia de otros secadores, el equipo desarrollado en este método no presenta contacto directo entre el producto y el medio de transferencia de calor evitando la contaminación cruzada (Nindo y Tang, 2007), además la superficie de la película solo necesita limpiarse al final del proceso o cuando un producto diferente sea procesado (Nindo et al., 2004). Muchos estudios se han realizado empleando el secador RW, por ejemplo, la evaluación de la actividad antioxidante del puré de espárragos (Nindo et al., 2003b) y aloe (Nindo et al., 2006); el flavor, color, carotenoides, capsaicinoides del puré de pimentón (Topuz et al., 2011), los compuestos antioxidantes del puré de tomate (Abul-Fadl y Ghanem, 2011); así como los compuestos bioactivos de rodajas de papa (Kaspar et al., 2012) y la reducción microbiana en puré de calabaza (Nindo et al., 2003a).

Por otro lado, dentro de los aspectos físicos que han sido evaluados se incluye la eficiencia energética, las propiedades de sorción de humedad tales como la rehidratación del jugo de tomate seco (Abul-Fadl y Ghanem, 2011) y el jugo de mango (Capariño et al., 2012), la actividad de agua del aloe (Nindo et al., 2006); la difusividad efectiva y el encogimiento de rodajas de mango (Ochoa-Martínez et al., 2012) encontrándose que la retención de color, aroma, vitaminas y antioxidantes pueden ser mejoradas en este proceso de secado y la calidad final del producto puede ser comparable o en algunos casos mejor que la liofilización. La mayoría de los estudios sobre el secado por RW se han llevado a cabo en puré o zumo de frutas y verduras; sin embargo, esta técnica también podría ser atractiva para el secado de rodajas de frutas y verduras de piel dura, como el mango y papas mencionados anteriormente.

Básicamente el secador RW opera a presión atmosférica para evaporar el agua de los alimentos, siendo considerado un secador versátil con potencial para el procesamiento de productos nutracéuticos, farmacéuticos, biotecnológicos y

químicos, así como en la recuperación y remediación en una amplia gama de industrias (Nindo et al., 2004). Es por ello que para minimizar las pérdidas de atributos de calidad físicas y químicas durante el secado y obtener productos con mejor calidad para los consumidores, la combinación de DO como pretratamiento seguida del secado por ventana refractiva podría ser útil para este fin, sin embargo no existe información acerca de ello, por lo tanto para evaluar esta combinación se requiere del empleo de alimentos modelo.

2.4 BETABEL.

El betabel (*Beta vulgaris* L.) perteneciente a la familia Chenopodiaceae, es una planta que produce raíces tuberosas rojas o púrpuras firmes, de forma esférica y sin tejido mucilaginoso. Su rasgo característico es la presencia de un distintivo color rojo brillante como se aprecia en la figura 3 (Pavoković et al., 2009). El betabel predominantemente contiene pigmentos llamados betalaínas, una clase de derivados del ácido betalámico, dentro de los cuales se encuentran las denominadas betacianinas, betaxantinas (Pitalua et al., 2010) y algunos compuestos fenólicos; otros pigmentos de la raíz del betabel son las betaninas (betanidida 5-O-glucósido), Isobetanina (isobetanidina 5-O-glucosido), Vulgaxantina-I y Vulgaxantina II (Kujala et al., 2001).



Figura 3. Raíz de betabel.

2.4.1 COMPOSICIÓN NUTRICIONAL.

El betabel es considerado una buena fuente de minerales y es recomendado por su bajo valor calórico, así como por su riqueza en compuestos bioactivos como ácido ascórbico, carotenoides, ácidos fenólicos y flavonoides (Wootton-Beard y Ryan, 2011). En la tabla 1 se muestra la composición proximal de 100 g de betabel fresco.

Tabla 1. Composición proximal de 100 g de betabel fresco.

Componente	g
Agua	87.58
Proteína	1.61
Lípidos totales	0.17
Cenizas	1.08
Carbohidratos (por diferencia)	9.56
Fibra dietaria total	2.80
Azúcares totales	6.76

Fuente: Adaptado de Neelwarne y Halagur, 2013.

Además de la pigmentación, el betabel es abundante en folato de la vitamina B, la cual es esencial para varios procesos de donación de carbonos en el crecimiento normal de los tejidos y funciones cognitivas. El folato en la dieta y su homólogo, el ácido fólico, juegan un papel importante en enfermedades cardiovasculares, el cáncer, en la prevención de los defectos del tubo neural de los infantes (Scott et al., 2000), además de exhibir actividad antioxidante (Joshi et al., 2001; Asensi-Fabado y Munne-Bosch 2010). Bajo condiciones de procesamiento típico el betabel pierde el 8% de vitaminas, 60% de color y 30% de folatos, sin embargo hay un significativo incremento del 5% en el contenido fenólico del betabel procesado (Jiratanan y Liu, 2004), lo cual puede ser la razón por que su actividad antioxidante no cambie después del proceso.

Por otro lado, además de impartir propiedades de color, las betalaínas proporcionan protección en humanos contra el estrés relacionado con desórdenes por oxidación lipídica y peroxidación (Kanner et al., 2001; Reddy et al., 2005), imparten efectos antiinflamatorios (Gentile et al., 2004) y ofrecen actividad antiradical y antioxidante (Butera et al., 2002; Cai et al., 2003; Stintzing et al., 2005; Tsai et al., 2009). Sin

embargo, muchos factores son responsables de la estabilidad de estos pigmentos, la mayoría de los procesos de degradación son iniciados por deshidrogenación, descarboxilación y oxidación de la molécula original, por otro lado, el contenido de agua influye significativamente en la degradación de las betalaínas del extracto, induciendo la actividad hidrolítica (Manchali et al., 2013), otros de los factores que influyen en la estabilidad de las betalaínas es el pH, la temperatura, la luz, la actividad de agua (a_w) y la presencia de oxígeno (Caí et al., 2001; Pedreño y Escribano, 2001; Tesoriere et al., 2005), tal estabilidad, es un factor que restringe su uso como colorante (Azeredo, 2009). De acuerdo con estas características, las betalaínas se pueden utilizar en alimentos con una corta vida de anaquel, procesados por un tratamiento de calor mínimo, envasándolos y colocándolos en un lugar seco, en niveles bajos de luz, oxígeno y humedad (Von Elbe, 1997). La tabla 2 muestra la composición fitoquímica del betabel.

Tabla 2. Composición fitoquímica del betabel

Clasificación	Compuesto
	Betalaínas
Betaxantinas	Vulgaxantina I
	Vulgaxantina II
Betacianinas	Betanina
	Isobetanina
	Fenoles
Ácidos felúrico conjugados	5,5', 6,6'-tetrahidroxi-3,3'biindolil
	Feruloilglucosa
	β - d-fructofuranosil- α -d-(6-O-(E)-feruloilglucopiranosido
Amidas fenólicas	N-trans- Feruloiltiramina
	N-trans- Feruloilhomovanil-amina
Flavonoides	Betagarina
	Betavulgarina
	Ciclofilina A
	Dihidroisoramnetina.

Fuente: Kujala et al., 2002.

Por esta razón, la conservación de este tipo de alimentos ha cobrado vital importancia y la aplicación de un método de secado para su conservación, conlleva a la evaluación de los cambios en su composición provocadas por la aplicación del

calor, estos cambios son cuantificados a través de la medición de algunas propiedades como las físicas y químicas.

2.5 PROPIEDADES FÍSICAS DE ALIMENTOS.

Para el consumidor, los atributos más importantes de los alimentos los constituyen sus características sensoriales tales como textura, aroma, forma y color, las cuales determinan las preferencias individuales del consumidor en determinados productos.

2.5.1 TEXTURA.

La textura de los tejidos vegetales tiene su base en la estructura celular, de manera que existe un efecto combinado de la presión de turgencia de los componentes celulares y de la elasticidad de la pared celular que determinan las propiedades viscoelásticas de los tejidos, estas propiedades están también afectadas por la composición de la fracción de pectina y especialmente por la fuerza de las uniones celulares a través de la lamela media y el grado de empaquetamiento celular. La fuerza de las uniones celulares y el nivel de turgencia son determinantes de su comportamiento mecánico (Chiralt et al., 2001). Los métodos de procesado de alimentos destruyen la integridad del plasmalema y la capacidad de la célula para mantener su turgencia, por lo que el procesado del alimento por calor también dará como resultado cambios en la pared celular, particularmente en la lamela media (el inicio de la rotura de la pectina conduce a la separación celular), así como otros cambios dependientes de la composición del producto como puede ser la gelatinización del almidón en el caso de que esté presente. En particular, en el procesos de secado, la pérdida de agua y la exposición a altas temperaturas durante el proceso provocan el encogimiento celular y por consiguiente cambios en la textura (Rosenthal, 2001).

2.5.1.1 Firmeza.

La firmeza se utiliza para determinar la frescura y calidad de frutas y vegetales, siendo en muchos alimentos el factor clave en la decisión del consumidor para aceptar el producto, además se relaciona con la madurez y puede ser un indicador de la vida útil del mismo, comúnmente es medida usando pruebas sensoriales o mecánicas, mediante pruebas de compresión o punción, las cuales son técnicas destructivas. En esta prueba una sonda cilíndrica con un diámetro estandarizado es impulsada en el vegetal a una distancia definida, la fuerza máxima se expresa como la firmeza (N) (Arana, 2012), la penetración en el alimento se lleva a cabo hasta una profundidad tal que cause un flujo del material. Por lo general se mide la fuerza máxima de penetración como una medida de firmeza o consistencia del producto y su cohesión interna (Aguilera et al., 2001).

2.5.2 COLOR.

El color es uno de los atributos importantes de los alimentos, es considerado un indicador de calidad y una característica sensorial esencial para la aceptación del consumidor. El análisis de color en alimentos es un tema de gran interés para la industria alimentaria y se hace por medio de una evaluación visual o instrumental. En la evaluación instrumental, los instrumentos de medición de color pueden ser los colorímetros triestímulos y espectrofotómetros. La aplicación de colorímetros triestímulos ofrece una manera objetiva de medir el color, debido a que toman en consideración todo el espectro visible y hace posible la obtención real del perfil cromático de cada compuesto o producto alimenticio. La CIE (Commission Internationale de l'Eclairage o la Comisión Internacional de Iluminación) recomienda la escala de color conocida como CIELCH o $L^*C^*H^*$, donde los parámetros cromáticos del espacio de color se miden empleando coordenadas polares (Wrolstad y Smith, 2010).

Los parámetros cromáticos del espacio de color CIELCH son:

- Luminosidad (L^*), un atributo relacionado con la transmisión de la luz observada en el espectro, la escala de este parámetro va de 0 para negro puro a 100 para el blanco puro (Hunterlab, 2013). El negro, el blanco y los grises se llaman “colores neutrales” ya que no presentan matiz. Los colores que tienen un tono se denominan “colores cromáticos”. Este valor se aplica a la escala cromática así como a los colores neutrales.
- Hue ($^{\circ}h$), es la expresión cualitativa de la cromaticidad, es el “color” actual que sigue un orden natural: rojo, amarillo, verde, azul y púrpura, designando el principio de matices. Entre cada tono hay intermedios: amarillo-rojo, verde-amarillo, azul-verde y rojo-púrpura.
- Croma (C^*) describe la saturación de un color, en otras palabras, qué tan cerca está el color ya sea al gris o al matiz puro. Colores de cromaticidad bajo se denominan “débiles”, mientras que los de alta cromaticidad se dice que están “altamente saturados”, “fuertes” o “vivos”.

2.6 PROPIEDADES QUÍMICAS.

Epidemiológicamente, varios estudios han demostrado que las dietas ricas en alimentos vegetales protegen a los humanos contra enfermedades degenerativas tales como el cáncer y enfermedades cardiovasculares. Los alimentos vegetales contienen fibra, vitaminas, fitoesteroles, compuestos azufrados, carotenoides y ácidos orgánicos, que tienen un efecto benéfico en la salud, además de una variedad de compuestos polifenoles que son considerados como efectivos agentes protectores (Manach et al., 2005).

2.6.1 COMPUESTOS POLIFENÓLICOS.

Los polifenoles en la dieta han recibido gran atención entre los nutricionistas, científicos en alimentos y consumidores debido al papel que representan en la salud

humana. Recientes investigaciones soportan el rol de estos compuestos en la prevención de enfermedades degenerativas, particularmente el cáncer, enfermedades cardiovasculares y enfermedades neurodegenerativas. Las frutas, verduras, granos y bebidas tales como el té, chocolate y vino son fuentes ricas en polifenoles. Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios de las plantas, que intervienen en la protección contra los herbívoros y patógenos, debido a sus efectos tóxicos y anti-nutricionales, estos contienen uno o más anillos aromáticos con más de un grupo hidroxilo, generalmente se clasifican en cuatro grupos dependiendo del número de anillos fenólicos y los grupos químicos enlazados a los anillos, en flavonoides, ácidos fenólicos, estilbenos y ligninas (Carratu y Sanzini, 2004), estos son un diverso grupo de compuestos conformados desde moléculas simples de bajo peso molecular hasta moléculas complejas de alto peso molecular que debido a la gran diversidad en su estructura, presentan diferentes propiedades, tales como la solubilidad y polaridad las cuales permiten tener diferentes interacciones con otras moléculas (Jakobek, 2015).

2.6.1.1 Flavonoides.

Los flavonoides son compuestos polifenólicos que comprenden 15 átomos de carbono, con dos anillos aromáticos conectados por un puente de tres carbonos, C6-C3-C6. Son los más numerosos de los compuestos fenólicos y se encuentran distribuidos en el reino vegetal, presentes en la epidermis de hojas y en la piel de frutas (Crozier et al., 2009). Los flavonoides comparten una estructura común que consiste en dos anillos aromáticos (A y B), los cuales se enlazan por tres átomos de carbono, formando anillo heterocíclico oxigenado (anillo C) como se muestra en la figura 4. Basada en la variación del tipo de heterociclo formado, los flavonoides pueden ser divididos en: flavonoles, flavonas, flavanonas, flavanoles, antocianinas y las isoflavonas (Kroon et al., 2004).

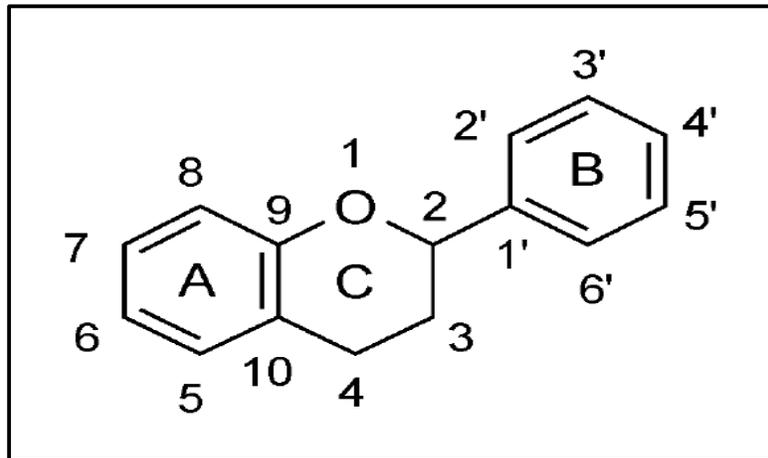


Figura 4. Estructura básica de un flavonoide (Crozier et al., 2009)

Las diferencias individuales de cada grupo surgen de la variación en el número y posición de los grupos hidroxilos y su alquilación y/o glicosilación, existiendo en la naturaleza en su mayoría en forma glicosilada. Los azúcares y los grupos hidroxilos incrementan la solubilidad de los flavonoides, otros sustituyentes como los grupos metilo y unidades isopentil, hacen a los flavonoides lipofílicos (Crozier et al., 2009). Los flavonoides más importantes en el betabel son las flavonas y flavonoles. La apigenina y la luteolina son las principales flavonas; mientras que la quercetina, miricetina y kaempferol, son los principales flavonoles. La (-)-epicatequina y (-)-galato epicatequina (Murthy y Manchali, 2013), así como la rutina, betagarina y betavulgaxantina (Georgev et al., 2010) son otros flavonoides encontrados en el betabel.

2.6.1.2 Ácidos fenólicos.

Los ácidos fenólicos son compuestos no flavonólicos que se dividen en dos tipos principales: los derivados del ácido benzoico y ácido cinámico con una estructura base de C1-C6 y C3-C6. Las frutas y vegetales contienen muchos ácidos fenólicos libres, mientras que en los granos y semillas (particularmente el salvado o cáscara) los ácidos fenólicos se encuentran a menudo en forma enlazada (Kim et al., 2006;

Chandrasekara y Shahidi, 2010). Estos ácidos fenólicos solo pueden ser liberados o hidrolizados por hidrólisis ácida o alcalina, o por enzimas. En el betabel, Georgev et al. (2010) demostraron la presencia de ácido 4-hidroxibenzoico, ácido cafeico y ácido clorogénico. En la figura 5 se muestra la estructura del ácido cafeico y clorogénico.

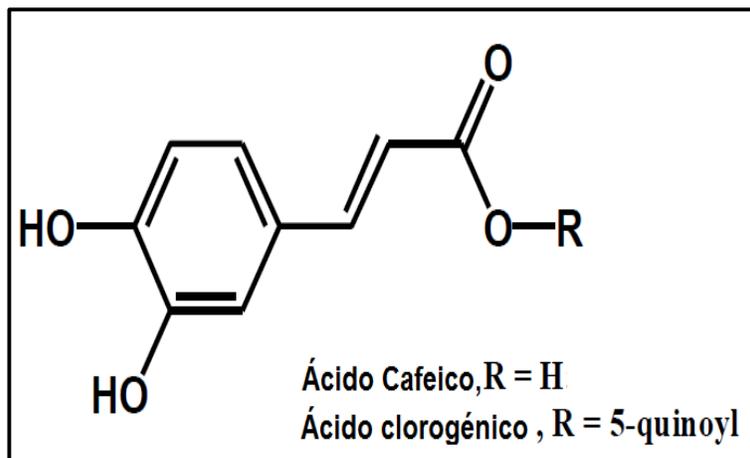


Figura 5. Estructura del ácido cafeico y clorogénico (Tsao, 2010).

2.6.2 ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE POLIFENOLES.

Diversos estudios han sugerido que el incremento excesivo de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés, reactive oxygen species) en el cuerpo humano están involucradas en un número de eventos patológicos y daño oxidativo a los componentes celulares, jugando un papel patofisiológico en muchos tipos de enfermedades humanas (Lee y Jeong, 2007). Las ROS inducen alteraciones en componentes celulares, tales como la peroxidación lipídica y daños en el ADN, los cuales se consideran claves en el desarrollo de enfermedades crónicas degenerativas tales como las enfermedades inflamatorias, enfermedades del corazón, hipertensión y algunas formas de cáncer (Harrison y Gongora, 2009; Visconti y Grieco, 2009). Los alimentos naturales y sus derivados alimenticios antioxidantes tales como las vitaminas y fitoquímicos fenólicos han tenido gran atención, debido a que son conocidos por su función como agentes quimiopreventivos contra el daño oxidativo. Numerosos polifenoles muestran

actividad de captación de radicales libres/antioxidante, especialmente cuando se estudian en sistemas celulares libres (Rüweler et al., 2008). Los polifenoles han sido encontrados como fuertes antioxidantes que pueden neutralizar los radicales libres por medio de la donación de un electrón o un átomo de hidrógeno. Los sistemas altamente conjugados y ciertos patrones de hidroxilación tales como los grupos 3-hidroxi en flavonoides son considerados importantes en la actividad antioxidante. Los polifenoles inhiben la generación de los radicales libres, así reducen la velocidad de oxidación por la inhibición de la formación o desactivación de especies reactivas y precursores de radicales libres, con frecuencia actúan como eliminadores de radicales directos de las reacciones en cadena de peroxidación de lípidos (interrumpiendo la cadena) (Tsao, 2010; Pietta, 2000). Además de la eliminación de radicales libres, los polifenoles son conocidos por la formación de quelatos metálicos. La quelación de metales de transición como el Fe^{+2} puede reducir directamente la velocidad de la reacción del Fenton y prevenir así la oxidación causada por los radicales hidroxilos altamente reactivos (Perron y Brumaghim, 2009), sin embargo, los polifenoles no actúan solos, se ha encontrado que pueden actuar como un co-antioxidante y estar involucrados en la regeneración de las vitaminas esenciales (Zhou et al., 2005).

2.7 INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS COMO ANTECEDENTES.

Nindo et al. (2007). Investigaron la influencia de un nuevo método de evaporación, el evaporador RW, evaluando la influencia de la temperatura en la concentración de vitamina C y el color en el jugo de arándano, comparándolo con el evaporador convencional multi-etapas (ME) de película descendente. Los autores consideraron el efecto del agua del proceso y las temperaturas del producto sobre la velocidad de evaporación. Durante la evaporación con RW, la concentración de vitamina C en el jugo de arándano se redujo en un 32 y 48% con temperaturas en el producto de 55.5 y 59.0 °C respectivamente. Mientras que para la concentración del mismo jugo a 65 °Brix empleando un evaporador de película industrial que operaba a 68 °C se redujo el contenido de vitamina C hasta un 70.1%. El color del jugo de arándano,

definido por el tono del ángulo Hue, no fue significativamente diferente entre los concentrados del evaporador RW y los métodos de evaporación de película convencional.

Ochoa-Martínez et al. (2012). Realizaron el secado de rebanadas de mango con espesor de 1 y 2 mm en el RW con un baño de agua a 92 °C, evaluando las cinéticas de secado, actividad de agua y la diferencia total de color (ΔE), las cuales fueron comparadas con las obtenidas con el secador de charolas con aire caliente a 62 °C con una velocidad de 0.52 m/s; encontrando que después de 1 h de secado, la humedad se redujo a 0.013 (para 1 mm de espesor) y a 0.048 (2 mm de espesor) kg agua/kg sólido seco para el secado RW, y de 0.966 (1 mm de espesor) y a 3.614 (2 mm de espesor) kg agua/kg sólido seco para el secado en charolas. La actividad de agua después de 1 hora de secado fue menor de 0.5 para el secado RW y cerca de 0.97 para el secado en charolas. En el caso del secado en charola fueron necesarios 4 h para obtener el producto con las mismas características que el producto secado con RW durante 1 h. El cambio de color del producto fue similar en ambos métodos de secado y en algunos casos fue menor en el RW. Las muestras secadas con RW mostraron alta difusividad comparadas con las secadas por aire caliente, no obstante, las rodajas de 2 mm de espesor mostraron la difusividad más alta y menores signos de deterioro por el calentamiento térmico.

Castoldi et al. (2015). Investigaron el secado de pulpa de tomate por RW y los efectos de las condiciones de proceso sobre la velocidad de secado y las características del polvo obtenido, empleando diferentes temperaturas del agua en el RW (65, 75, 85 y 95 °C) y espesores de 2 y 3 mm en pulpas de tomate de 4.8-5.2 °Brix. Las características de polvo fueron obtenidas analizando su solubilidad, tiempo de dispersión, isoterma de sorción de agua y el color. El tiempo más corto de secado fue observado para la pulpa de tomate con menor espesor y secado con la temperatura más alta. La solubilidad del polvo de tomate fue aproximadamente del 80% y el tiempo de dispersión fue menor de un minuto. La diferencia total de color del polvo rehidratado mostró un incremento con el aumento de la temperatura

del proceso. Los resultados indicaron que el RW fue una técnica adecuada para la producción de polvo de tomate.

Rodríguez et al. (2015). Analizaron la influencia del proceso de secado por métodos combinados empleando la deshidratación osmótica y secado con aire caliente de ciruelas. La deshidratación osmótica fue desarrollada empleando glucosa y sorbitol en diferentes concentraciones (40 y 60 °Brix), temperaturas (25 y 40 °C) y relación de producto-solución (1:4 y 1:10). El secado por aire caliente fue desarrollado a diferentes temperaturas (60, 70 y 80 °C). Las ciruelas secas fueron evaluadas en términos de color, textura, rehidratación, compuestos fenólicos (fenoles totales y flavonoides) y la actividad de agua. El análisis de color mostró una disminución en la luminosidad y un incremento del enrojecimiento debido al oscurecimiento durante el proceso de secado. La firmeza de las ciruelas se incrementó con respecto a la muestra fresca, este aumento fue más evidente con el incremento de la temperatura de secado, por otro lado las altas temperaturas de secado provocaron un colapso en la estructura de la ciruela, lo que afectó la absorción de agua en el proceso de rehidratación. La retención de los compuestos fenólicos fueron afectados por la temperatura de secado, el contenido de fenoles y flavonoides fue mayor cuando se secaron a 70 °C. Las ciruelas osmodeshidratadas en sorbitol 60% (p/p), con una relación fruta-solución 1:10, a 25 °C de DO y secado a 70 °C, obtuvieron un alto grado de deshidratación y retuvieron mejor los atributos de calidad.

Hernández-Santos et al. (2016). Compararon el secado con RW y secado convectivo en rodajas de zanahoria con 3 cm de diámetro y con espesores de 2 y 4 mm a temperaturas de 74 y 94 °C. La pérdida de humedad, textura, color, contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante fueron evaluadas como variables de respuesta y se compararon con un control (zanahoria fresca). El método RW produjo una reducción del tiempo de secado de 26 a 51% ($p < 0.05$) en comparación con el secado convectivo, este tiempo fue notablemente más corto cuando se emplearon rodajas con espesor de 2 mm en ambas temperaturas. El color, el contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante para el tratamiento con RW no mostró

diferencia significativa ($p < 0.05$) en comparación con el control, siendo mejores que los obtenidos para el secado convectivo. Los valores de textura mostraron diferencia significativa con respecto al control en ambos métodos de secado. Sin embargo, no hubo diferencia significativa en la textura ($p < 0.05$) entre los dos métodos de secado. Los resultados sugieren que la tecnología RW se puede usar en alimentos sólidos con piel dura para desarrollar productos con mejores propiedades funcionales en comparación con los obtenidos a través de métodos convencionales de secado con aire.

2.8 JUSTIFICACIÓN.

Las frutas y vegetales son perecibles debido a su alto contenido de humedad. El secado remueve esta humedad por la transferencia simultánea de calor y masa, por ello es uno de los procesos más usados en la conservación de alimentos. Los secados convencionales en la deshidratación de alimentos causan daños en las propiedades físicas tales como color y textura, así como en el deterioro de compuestos aromáticos y nutricionales que reducen su calidad, los cuales son provocados por tiempos prolongados de secado y altas temperaturas, incluyendo resquebrajamiento y reducción de tamaño en la partícula a secar, así como la disminución de la aceptación general del consumidor. Por ello con el fin de disminuir el tiempo de exposición en estos secadores convencionales se ha utilizado a la deshidratación osmótica como un método de deshidratación parcial, que además de disminuir el contenido de humedad de los alimentos, minimiza las pérdidas de compuestos de interés nutricional y evita la deformación de producto al término del proceso. Generalmente los alimentos pretratados con deshidratación osmótica finalizan el proceso con el secado convectivo y microondas, sin embargo las nuevas tecnologías desarrolladas como el secado por ventana refractiva (RW) podría ser efectivo en la etapa final de secado de alimentos pretratados con deshidratación osmótica (DO). El secado por ventana refractiva se caracteriza por cortos tiempos de secado, disminución de los gastos de energía y por producir alimentos con una mayor retención de calidad en propiedades físicas, nutritivas y sensoriales. Sin

embargo, actualmente no se conoce información suficiente acerca del efecto de la combinación de la deshidratación osmótica y el secado por ventana refractiva en alimentos modelo con piel dura. Por lo tanto con la finalidad de evaluar el efecto de este método combinado, la selección de un alimento modelo como el betabel podría ser efectivo en dicha evaluación, dado que este posee una humedad de 87.5%, ocasionando que sea un alimento altamente perecedero, además de contener fitonutrientes de interés como los polifenoles, al mismo tiempo es un alimento en el que los cambios de color y textura serían fácilmente apreciables al término del proceso de secado y de esta manera generar conocimiento científico para la posible aplicación en otros alimentos con características similares.

2.9 OBJETIVOS.

2.9.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar el efecto combinado de deshidratación osmótica y secado por ventana refractiva en algunas propiedades físicas y químicas del betabel como alimento modelo.

2.9.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar las cinéticas experimentales y simuladas por un modelo matemático de pérdida de agua y ganancia de sólidos mediante la deshidratación osmótica de betabel.
- Estimar la difusividad efectiva del agua y del soluto mediante el empleo de un modelo matemático durante la deshidratación osmótica de betabel.
- Obtener las cinéticas de secado del betabel empleando tecnología con ventana refractiva (RW) y su efecto combinado con DO-RW.
- Medir las propiedades físicas de color y textura empleando la DO, RW y el efecto combinado de DO-RW.

- Evaluar las propiedades químicas de contenido de polifenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante de los extractos de betabel sometido a DO, RW y el efecto combinado de DO-RW.

MATERIALES Y MÉTODOS

III. MATERIALES Y MÉTODOS.

El desarrollo experimental llevado a cabo en este trabajo de investigación se resume en la figura 6, el cual se realizó en el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos del Instituto Tecnológico de Tuxtepec, Oaxaca, México.

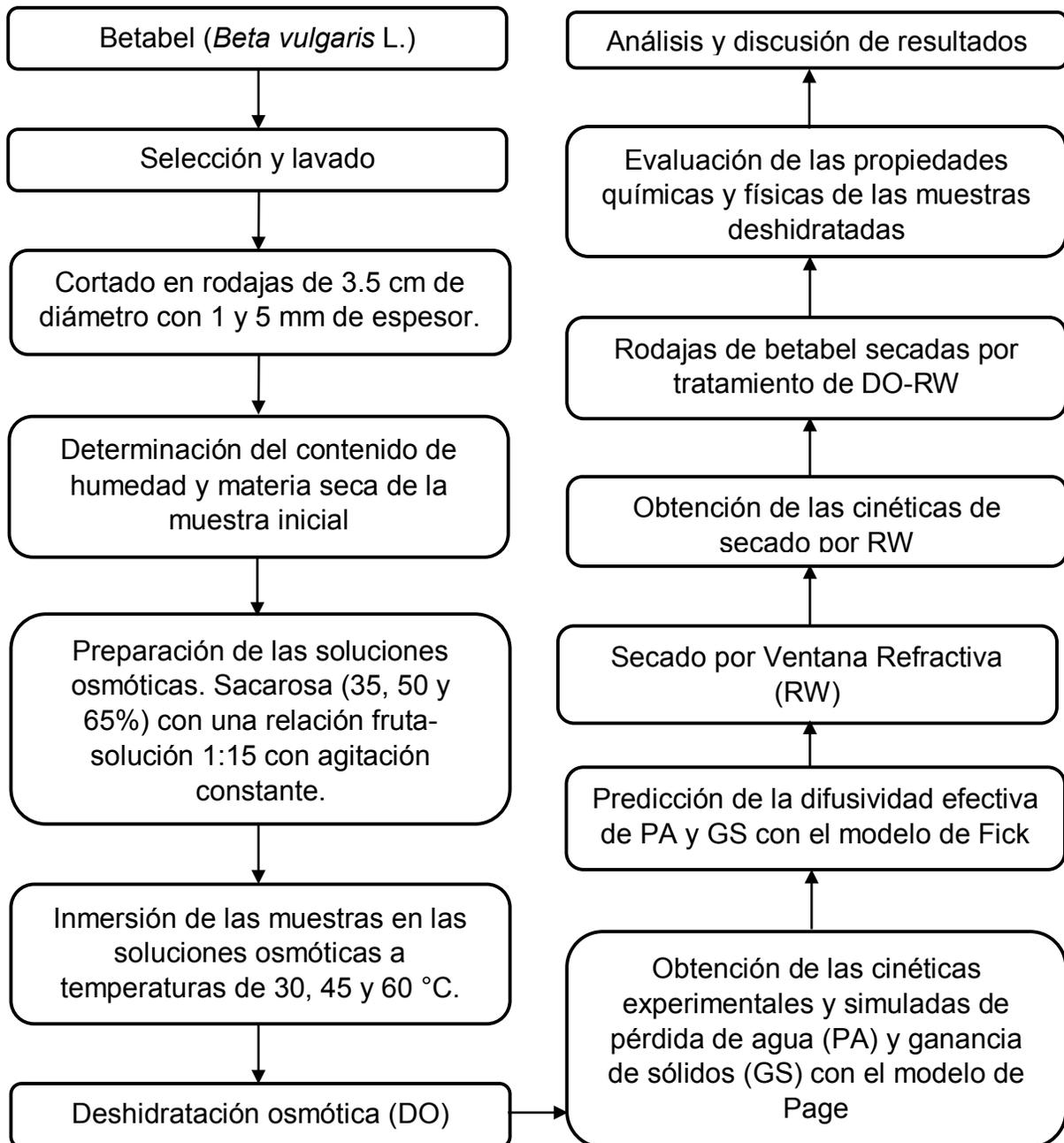


Figura 6. Desarrollo experimental del proyecto de investigación

3.1 CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE BETABEL.

Con el fin de establecer un criterio de homogeneidad, el betabel empleado durante los tratamientos experimentales de DO y RW se obtuvo del mercado local con un grado de madurez comercial y fue seleccionado por el nivel de coloración, forma y tamaño uniforme. El betabel fue lavado, pelado manualmente y cortado en rodajas de 3.5 cm de diámetro con espesores de 1 y 5 mm.

3.2 DETERMINACIÓN DE LAS CINÉTICAS EXPERIMENTALES DE DO PARA BETABEL.

Se prepararon soluciones de sacarosa a concentraciones de 35, 50 y 65% a tres temperaturas: 30, 45 y 60 °C. La relación producto: solución fue de 1:15 (p/v). El calentamiento y la agitación fueron proporcionados por una placa de calentamiento (Thermo Scientific Cimares, modelo SP131325, EUA) sobre la cual fue colocado un cristalizador de 2500 mL que contenía la solución osmodeshidratante, este fue equipado con un controlador de temperatura externo (Johnson Controls, A419 Inc., Wisconsin, EUA) sumergido en la solución. La solución fue cubierta con polietileno para reducir la evaporación y concentración de las soluciones osmóticas. Las muestras fueron inmersas y monitoreadas por 3.5 h hasta que el equilibrio fue alcanzado y retiradas de la solución en diferentes intervalos de tiempo de la DO, eliminando el exceso de la solución osmótica con ayuda de papel absorbente. A continuación se determinó el contenido de humedad empleando el método oficial de la estufa (No. 925.10) de la AOAC (2005), para esto se utilizó una estufa de secado de flujo convectivo (Estufa Binder, ED 115, Alemania). Los resultados de pérdida de agua (PA) y ganancia de sólidos (GS) fueron calculados utilizando las ecuaciones (1) y (2), que se obtuvieron a partir de un balance de masa (Beristain et al., 1990).

$$PA = \frac{(M_0)(X_{a,0}) - (M_t)(X_{a,t})}{M_0} \quad (1)$$

$$GS = \frac{(M_t)(1 - X_{s,t}) - (M_0)(1 - X_{s,0})}{M_0} \quad (2)$$

Donde, PA es la pérdida de agua (g de agua/g de muestra fresca), M_0 es el peso inicial de la muestra en g, M_t es el peso de la muestra a un tiempo determinado en g, $X_{a,0}$ es la fracción másica de agua inicial en g agua/g alimento seco, $X_{a,t}$ es la fracción másica de agua a un tiempo determinado en g agua/g alimento seco, GS es la ganancia de sólidos (g de sólidos/g de muestra fresca), $X_{s,0}$ es la fracción másica de sólidos inicial en g sólidos/g alimento seco y $X_{s,t}$ es la fracción másica de sólidos a un tiempo determinado en g sólidos/g alimento seco. En la tabla 3 se muestran las condiciones experimentales para la obtención de las cinéticas experimentales de DO en betabel de 1 y 5 mm de espesor. Las cinéticas de deshidratación osmótica se obtuvieron graficando la PA y GS contra el tiempo (min).

Tabla 3. Condiciones experimentales para la obtención de cinéticas de DO en betabel fresco.

Tratamiento	Espesor de rodaja	Concentración de sacarosa (%)	Temperatura (°C)
T1	1 mm	35	30
T2	1 mm	35	45
T3	1 mm	35	60
T4	1 mm	50	30
T5	1 mm	50	45
T6	1 mm	50	60
T7	1 mm	65	30
T8	1 mm	65	45
T9	1 mm	65	60
T10	5 mm	35	30
T11	5 mm	35	45
T12	5 mm	35	60
T13	5 mm	50	30
T14	5 mm	50	45
T15	5 mm	50	60
T16	5 mm	65	30
T17	5 mm	65	45
T18	5 mm	65	60

Los tratamientos fueron realizados por duplicado.

3.3 PREDICCIÓN DE CINÉTICAS DE PA Y GS DURANTE LA DO.

Para la predicción de las cinéticas experimentales de PA y GS de las rodajas de betabel se utilizó el modelo de Page mostrado en la ecuación 3 por regresión no lineal utilizando el software Matlab Versión 7.10.0.499-R2010a (MathWorks Inc., Natick, MA, USA). Los datos experimentales y los valores predichos por la ecuación de Page se analizaron a través del coeficiente de determinación (R^2) (Ochoa-Martínez et al., 2007; Gaware et al., 2010).

$$PA \text{ ó } GS = e^{(-At)^B} \quad (3)$$

Donde: PA o GS es la pérdida de agua o ganancia de sólidos, A y B son valores constantes de Page y t es el tiempo de proceso de DO en min.

3.4 PREDICCIÓN DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DURANTE LA DO.

Para la predicción de la difusividad efectiva del agua y de sólidos de las rodajas de betabel se utilizó la ecuación de la 2da. Ley de Fick mostrada en la ecuación 4, mediante regresión no lineal utilizando el software Matlab Versión 7.10.0.499-R2010a (MathWorks Inc., Natick, MA, USA). Los valores predichos por la ecuación de Fick (García-Toledo et al., 2016) se analizaron a través de un análisis de varianza ($p < 0.05$) para obtener su significancia. El modelo fue utilizado considerándose la muestra como una placa plana infinita, una concentración de la solución osmótica constante, proceso de la DO isotérmico y ausencia de cualquier resistencia externa al transporte de masa.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

Dónde: C es la concentración (de agua o de sólidos) en kg/m^3 , D es el coeficiente de difusión efectivo o aparente en m^2/s , t es el tiempo en s y, X es la distancia desde el centro del producto en m.

3.5 ACONDICIONAMIENTO DEL SECADOR RW.

El secador RW utilizado fue una adaptación a nivel laboratorio, este consistió en una charola de acero inoxidable con 52.5 cm de longitud, 32.5 cm de ancho y 16 cm de profundidad, la cual fue equipada con dos resistencias y un termostato, como fuentes de calentamiento y regulación de temperatura interna del baño, respectivamente; la charola fue cubierta con una carcasa hecha de un material aislante. Además, el equipo fue adaptado con un controlador de temperatura externo (Johnson Controls, A419 Inc., Wisconsin, EUA) para monitorear la temperatura del alimento sobre la película de Mylar®.

El equipo fue llenado con agua de la llave hasta un 99% de su capacidad. Posteriormente se colocó la película de Mylar® con espesor de 0.017 cm sobre la superficie de la bandeja con agua (de modo que la película de Mylar® flotara en el agua) y fue sujeta mediante dos pasadores metálicos de aluminio por los costados más largos de la bandeja. El agua del baño fue calentada hasta alcanzar temperaturas de 60 y 85 °C como temperaturas de operación del experimento, en la figura 7a se muestra el secador RW utilizado en este trabajo sin y con muestra 7b.

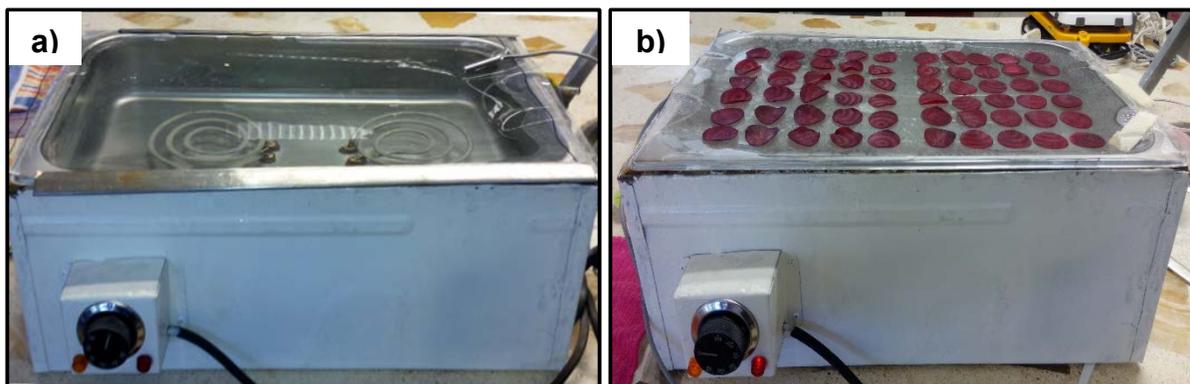


Figura 7. Secador RW adaptado a nivel laboratorio: a) Sin muestra y b) con muestra.

3.6 OBTENCIÓN DE LAS CINÉTICAS EXPERIMENTALES DEL SECADO POR RW Y DO-RW DE BETABEL.

Las cinéticas experimentales de secado por RW fueron obtenidas en rodajas de betabel con y sin pretratamiento de DO utilizando el equipo RW mostrado en la figura 8, donde la temperatura del baño de agua fue mantenida a 70 ± 2 °C y 98 ± 2 °C, para obtener temperaturas de 60 y 85 °C en la superficie de la película de Mylar®, respectivamente. El secado se llevó a cabo colocando una monocapa de rodajas de betabel sobre la superficie de la película de Mylar®, solo las rodajas con espesor de 1 mm fueron secadas con en el RW, debido a que este secador requiere espesores bajos de productos para obtener una mayor eficiencia en la evaporación de agua (Pavan et al., 2012; Abonyi et al., 2002). Con espesores gruesos como 5 mm en rodajas de betabel la eficiencia de evaporación es muy baja usando este tipo de tecnología. El total de las rodajas fueron pesadas inicialmente y se monitoreo la pérdida de peso a intervalos de tiempo hasta alcanzar el equilibrio. El contenido de humedad fue obtenido empleando el método oficial de la estufa No. 925.10 de la AOAC (2005), utilizando una estufa de secado de flujo convectivo (Estufa Binder, ED 115, Alemania). Las cinéticas de secado experimental se obtuvieron graficando el contenido de humedad adimensional contra el tiempo, esto fue debido a que los contenidos iniciales de humedad del betabel fueron diferentes en cada cinética de secado y de esta manera se aseguró que partieran de un mismo contenido de humedad inicial para una mejor comparación. El contenido de humedad adimensional de las muestras fue calculado con la ecuación 5 (Wang et al., 2010)

$$\Psi = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (5)$$

Donde, Ψ es la humedad adimensional, X_t la humedad del alimento en el tiempo t (g agua/g sólidos secos), X_e es la humedad en equilibrio (g agua/g sólidos secos), X_0 la humedad inicial de las rodajas (g agua /g sólidos secos) y t es el tiempo en minutos. Las condiciones experimentales de secado de las rodajas de betabel de 1 mm de espesor se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Condiciones experimentales para la obtención de cinéticas de RW y DO-RW en rodajas de 1 mm de espesor.

Tratamiento	Concentración de sacarosa (%)	Temperatura (°C)	Temperatura de RW (°C)
Sin DO	****	****	60 y 85
T1	35	30	60 y 85
T2	35	45	60 y 85
T3	35	60	60 y 85
T4	50	30	60 y 85
T5	50	45	60 y 85
T6	50	60	60 y 85
T7	65	30	60 y 85
T8	65	45	60 y 85
T9	65	60	60 y 85

Todos los tratamientos fueron realizados por duplicado.

3.7 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL BETABEL.

3.7.1 DETERMINACIÓN DE COLOR DE RODAJAS DE BETABEL.

La determinación del color fue desarrollada por triplicado sobre las rodajas pretratadas con DO, RW y la combinación DO-RW usando un colorímetro (UltraScan Vis, Hunter Associates Laboratory Inc., EUA) que se muestra en la figura 8a a través del software EasyMatchQC. Los resultados fueron expresados de acuerdo con el sistema CIELCH, expresando la medición de color como L* (luminosidad), cromaticidad (C*), ángulo hue (°h) y la diferencia total de color (ΔE), estos parámetros fueron calculados por medio de las ecuaciones 6, 7 y 8 respectivamente. El colorímetro fue calibrado con un filtro blanco estandar ($L^* = 99.32$, $a^* = -0.14$ y $b^* = 0.04$) y las mediciones se realizaron con una referencia al iluminante D65 y un ángulo visual de 10°.

$$c^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$^{\circ}h = \arctang\left(\frac{a^*}{b^*}\right) \quad (7)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (8)$$

3.7.2 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE TEXTURA POR PUNCIÓN

Se realizó la determinación del perfil de textura por punción de las rodajas de betabel pretratadas con DO, con RW y el efecto combinado DO-RW empleando un texturómetro (TA-XT plus, Stable Microsystems Inc., Reino Unido) como es mostrado en la figura 8b con la finalidad de medir la fuerza de fractura (pico máximo de fuerza), mediante ensayos de penetración empleando una sonda cilíndrica de 2 mm (P/2N), obteniendo la fuerza máxima expresada en N (Newtons). Las condiciones de operación del texturómetro para las rodajas de 1 mm de espesor fueron: velocidad pre-ensayo 2 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad post-ensayo 10 mm/s y distancia de compresión de 8 mm, mientras que para las de 5 mm de espesor las condiciones de operación fueron: pre-ensayo 2 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad post-ensayo 10 mm/s y distancia de compresión de 12 mm, ambos con una fuerza de contacto de 0.1 g. La medición de fuerza de fractura se realizó por triplicado y en cinco posiciones diferentes en cada rodaja, midiendo la fuerza en el centro y cuatro puntos alrededor de la misma, debido a la heterogeneidad de la muestra de betabel.

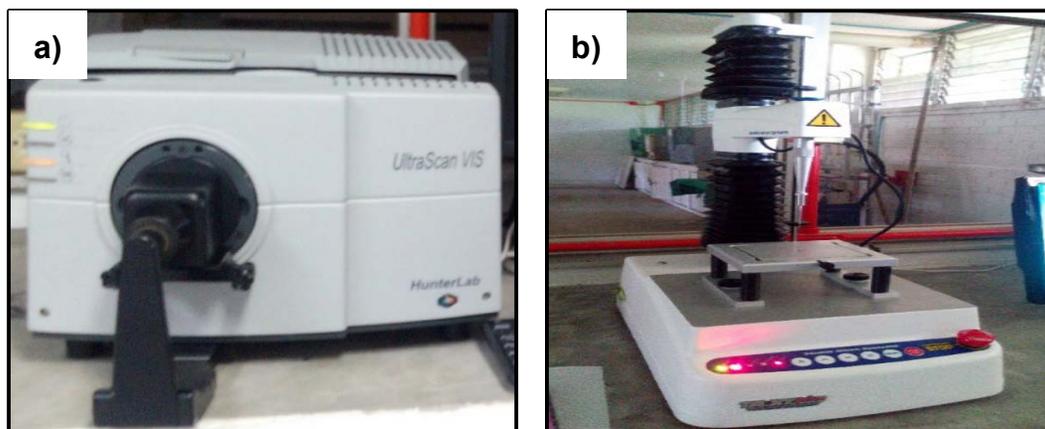


Figura 8. Equipos para la medición de propiedades físicas: a) Colorímetro UltraScan Vis y b) Texturómetro TA.XTPLUS.

3.8 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL BETABEL.

3.8.1 PREPARACIÓN DE LOS EXTRACTOS.

Las muestras pretratadas con DO, por RW, DO-RW y el testigo fueron trituradas utilizando una licuadora (Osterizer, Oster Inc. 6798, México). Los extractos de las muestras de betabel de los diferentes tratamientos y el testigo se obtuvieron mediante una extracción con acetona-agua al 80% con una relación muestra-solvente 1:10 (p/v). En un matraz Erlenmeyer se colocaron 5 g de muestra y a continuación se añadió la mezcla de acetona-agua al 80%, dejándose en agitación por 24 h en ausencia de luz, posteriormente se filtró para recuperar el sobrenadante y se procedió a evaporar el solvente utilizando un rotovapor (BÜCHI Labortechnik AG, R-3 HB, Suiza). El extracto obtenido fue utilizado para la determinación del contenido de polifenoles totales (CPT), contenido de flavonoides totales (CFT) y la capacidad antioxidante (CA) de los extractos.

3.8.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE POLIFENOLES TOTALES.

El análisis del CPT de los extractos fue determinado empleando el método de Folin-Ciocalteu empleando la técnica de Heimler et al. (2005). Se utilizó una curva estándar de ácido gálico a distintas concentraciones de 20, 40, 60, 80 y 100 ppm. En un tubo de ensaye se depositaron 125 μ L de muestra o del estándar (para el blanco se utilizó agua destilada), 500 μ L de agua destilada y 125 μ L de reactivo de Folin-Ciocalteu. La mezcla fue agitada y se dejó reposar por 6 min en oscuridad, pasado este tiempo se adicionó 1.25 mL de solución de Na_2CO_3 al 7% y 1 mL de agua destilada, se agitó en un vórtex y se dejó reposar por 90 min en oscuridad a temperatura ambiente. Se midió la absorbancia a 760 nm utilizando un espectrofotómetro (Cary 60 UV Vis, Agilent Technologies Inc. PCB-1500, Italia) como se muestra en la figura 9. Los resultados se expresaron como microgramos equivalentes de ácido gálico (EAG) por mL del extracto (μ g EAG/mL del extracto).



Figura 9. Espectrofotómetro Cary 60 UV Vis.

3.8.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE FLAVONOIDES TOTALES.

El análisis del CFT de los extractos se realizó empleando el procedimiento descrito por Heimler et al. (2005), realizando una curva de calibración con catequina a concentraciones de 20, 40, 60, 80 y 100 ppm. En un tubo de ensaye se colocaron 250 μL de muestra diluida en agua destilada (el blanco con agua destilada), se adicionó 75 μL de una solución de NaNO_2 al 5%, 150 μL de una solución recién preparada de AlCl_3 al 10% y 500 μL de NaOH 1M. Posteriormente se ajustó el volumen a 2.5 mL con agua desionizada y se dejó reposar durante 5 min, después de este tiempo la absorbancia fue medida a 510 nm. Los resultados fueron expresados como microgramos equivalentes de catequina (EC) por mL del extracto (μg EC/mL del extracto).

3.8.4 DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD ANTIOXIDANTE.

La habilidad de los extractos para eliminar los radicales DPPH^+ se analizó con la técnica descrita por Siddhuraju, (2006) con algunas modificaciones. Los extractos de los diferentes tratamientos fueron disueltos en metanol a concentraciones conocidas, de estas soluciones se tomaron 100 μL en un tubo de ensaye y se adicionaron 2.9 mL de solución metanólica de DPPH^+ , a continuación se agitaron

en un vórtex (Genie-1 Touch Mixer, Scientific industries Inc. G560E, EUA) y se dejó reposar por 30 min, la absorbancia fue leída a 515 nm en un espectrofotómetro (Cary 60 UV Vis, Agilent Technologies Inc. PCB-1500, Italia). La preparación del DPPH⁺ se obtuvo diluyendo éste reactivo en metanol hasta obtener una absorbancia entre 0.75-0.78, que fue leído en un espectrofotómetro (Cary 60 UV Vis, Agilent Technologies Inc. PCB-1500, Italia), se utilizó un blanco de referencia que contuvo 100 µL de metanol y 2.9 mL de solución de DPPH⁺. La capacidad antioxidante fue expresada como % de inhibición de los extractos y fue calculado con la ecuación 8:

$$\% \text{ Inhibición del extracto} = \left[1 - \frac{A_{\text{Muestra}}}{A_{\text{Blanco}}} \right] \times 100 \quad (8)$$

Donde: A_{Muestra} : Absorbancia de la muestra.

A_{Blanco} : Absorbancia del blanco.

3.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Los resultados obtenidos fueron analizados con un análisis de varianza (ANDEVA) y una prueba de comparación de medias por Fisher con un nivel de significancia del 95%, empleando el software Statistica versión 10, (StatSoft, Inc., 2011. STATISTICA data analysis software system, version 10. www.statsoft.com.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 CINÉTICAS EXPERIMENTALES Y SIMULADAS DE DO PARA PÉRDIDA DE AGUA CON SACAROSA AL 35, 50 Y 65 % EN BETABEL FRESCO.

Las cinéticas de PA experimentales y simuladas con el modelo de Page de rodajas de betabel sometidas a DO con solución de sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores, se muestran en la figura 10, en la cual se observó que la pérdida de agua aumentó a medida que se incrementó la concentración y la temperatura de la solución osmodeshidratante, presentándose la mayor PA durante los primeros 80 min del proceso de DO. Ésta pérdida rápida de agua en el inicio del proceso osmótico se debió a la alta presión osmótica que la solución de sacarosa ejerció sobre las células del betabel, como resultado de una diferencia de la fuerza impulsora entre la savia (fluido o líquido transportado por los tejidos de conducción de las plantas) del alimento y la solución osmótica circundante, llegando al equilibrio a los 120, 105 y 90 min del proceso de DO a las concentraciones de 35, 50 y 65% respectivamente para las rodajas de 1 mm de espesor, mientras que para las rodajas de 5 mm el equilibrio del proceso se presentó a partir de los 185, 155 y 135 min a las concentraciones de 35, 50 y 65% respectivamente. A partir de ese momento, un aumento en el tiempo no produjo cambios considerables en la PA, debido a que las rodajas de betabel durante ese tiempo de la DO se acercaron al equilibrio, provocando que los flujos de transferencia de masa se redujeran (Falade et al., 2007).

Los valores de PA en el equilibrio de los tratamientos de DO para las rodajas de betabel de 1 mm de espesor y concentraciones de sacarosa al 35% fueron de 0.31, 0.35 y 0.40 g de agua/g de muestra fresca; al utilizar solución de sacarosa al 50% fueron de 0.20, 0.46 y 0.49 g de agua/g de muestra fresca y al 65% de sacarosa los

valores de PA fueron de 0.43, 0.46 y 0.54 g de agua/g de muestra fresca, todas las concentraciones a las temperaturas de 30, 45 y 60 °C, respectivamente. Por otro lado, las rodajas de betabel de 5 mm de espesor presentaron valores de PA a la concentración de 35% de sacarosa 0.20, 0.32 y 0.35 g de agua/g de muestra fresca; al 50% se obtuvieron valores de 0.37, 0.45 y 0.52 g de agua/g de muestra fresca, mientras que para la concentración de 65% los valores de PA fueron de 0.43, 0.52 y 0.54 g de agua/g de muestra fresca, todas la concentraciones a las temperaturas de 30, 45 y 60 °C, respectivamente. La correlación entre las cinéticas experimentales y simuladas de PA fueron obtenidas por medio del coeficiente de determinación o regresión (R^2), obteniendo un valor promedio de todos los tratamientos con una $R^2 = 0.9851$, indicando así que el modelo de Page predijo adecuadamente el comportamiento experimental de la PA en las cinéticas de DO de las rodajas de 1 y 5 mm de espesor en las tres concentraciones de sacarosa y las tres temperaturas de operación.

Los resultados mostraron que el incremento de la concentración y la temperatura son factores que promueven la PA, siendo las concentraciones de 50 y 65% de sacarosa, a las temperaturas de 45 y 60 °C las que mayor PA mostraron, presentando una tendencia similar a los resultados encontrados por investigadores como Azoubel y Murr (2004); Kowalska y Lenart (2001) y Park et al. (2002), quienes mencionaron que el incremento en la concentración de la solución osmótica resultó en un aumento de los gradientes de presión osmótica y, por ende una mayor PA; indicando que la elección de un medio altamente concentrado, conlleva a tener algunos beneficios en términos de una rápida PA. Por otro lado, İspir y Toğrul (2009), deshidrataron osmóticamente durazno con diferentes agentes osmóticos, tales como sacarosa, glucosa, fructosa, maltodextrina y sorbitol a concentraciones de 40, 50, 60 y 70%, encontrando que la mayor PA fue obtenida a mayores concentraciones de todos los solutos empleados, incluyendo que la mayor PA fue con la solución de sacarosa, ya que la sacarosa, por el contrario que los monosacáridos, promueven la pérdida de agua en lugar de la ganancia de solutos (Devic et al., 2009).

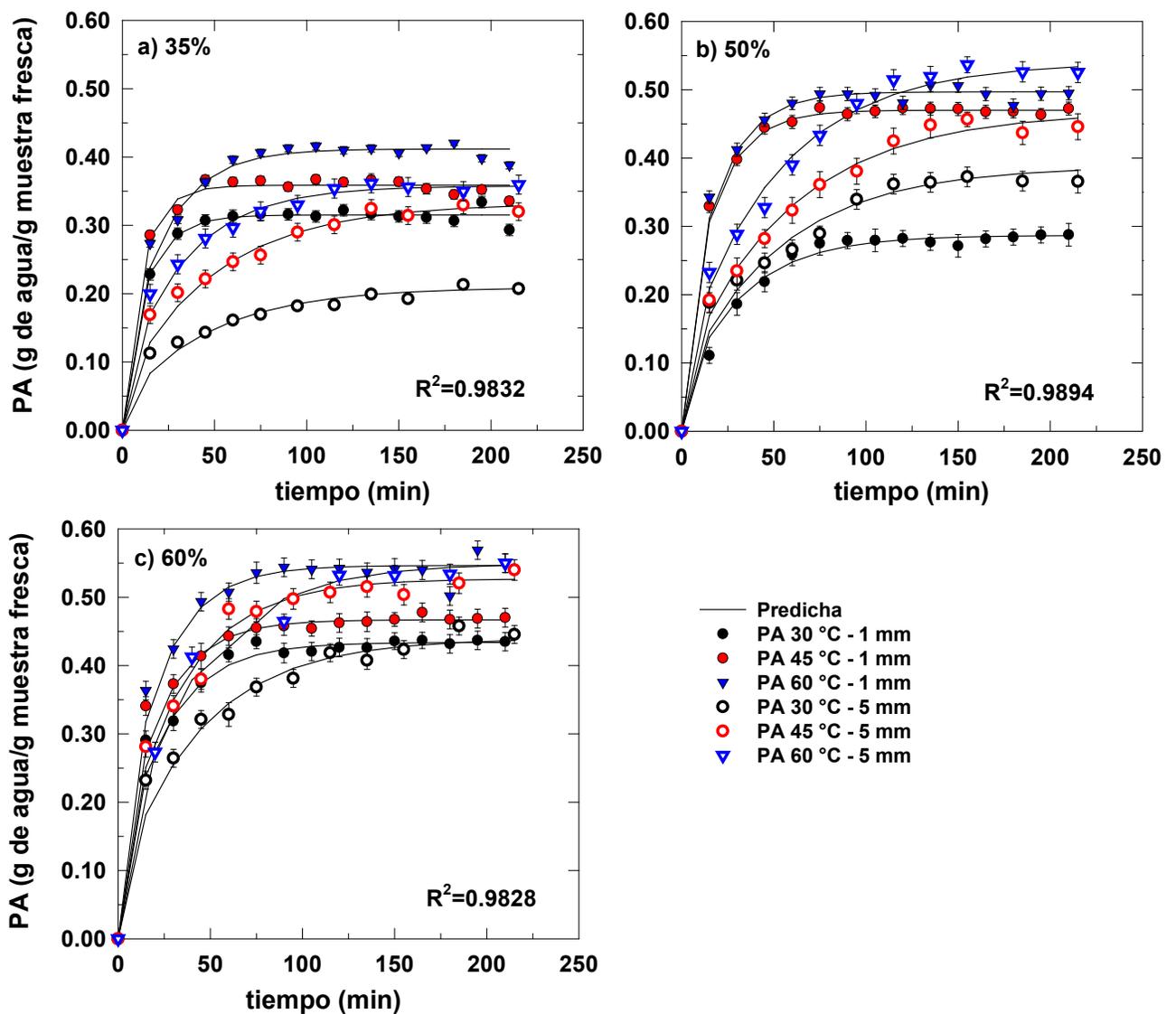


Figura 10. Cinéticas experimentales y simuladas de DO para pérdida de agua: a) 35, b) 50 y c) 65% de sacarosa a diferentes temperaturas y espesores.

De igual manera, el efecto de la temperatura fue similar en todos los tratamientos empleados, a medida que aumentó la temperatura la PA y GS se incrementaron (Sereno et al., 2001), ya que ésta produce cambios en la permeabilidad de la membrana celular y en la fluidez de la solución osmótica como lo reportó Cao et al. (2006) durante la DO de kiwi, además las altas temperaturas podrían causar

hinchamiento y plasticidad de las membranas celulares y éstas se vuelven más permeables reduciendo la viscosidad del medio osmótico lo que favorece la mayor transferencia de agua sobre la superficie del producto. Con respecto al efecto del espesor de las rodajas de betabel, los mayores valores de PA en la concentración de 35% se obtuvieron para las rodajas de 1 mm de espesor que para las de 5 mm, debido a la mayor presión osmótica en las rodajas delgadas que en las gruesas, haciendo que el flujo de transferencia de masa en las rodajas de 5 mm se viera limitado, mientras que para las concentraciones 50 y 65% de sacarosa no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ambos espesores a la temperaturas de 60 y 45 °C, siendo más adecuados los tratamientos de 1 mm debido a que alcanzaron el equilibrio en menor tiempo con una PA similar a las de 5 mm.

Estos resultados presentaron una tendencia parecida a los obtenidos por Falade et al. (2007), quienes deshidrataron osmóticamente bloques de sandía de diferentes espesores con solución de sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, encontrando que hubo un incremento de la pérdida de agua y ganancia sólidos con la disminución del espesor, debido a la relación de proporciones y al aumento en el área de superficie de contacto con la solución osmótica, donde las células que están en contacto directo con la solución perdieron más agua y liberaron presión de turgencia. De igual forma, Lewicki y Porzecka-Pawlak (2005), demostraron que a medida que las muestras fueron más pequeñas, la proporción de células que estuvieron en contacto con la solución osmótica aumentaron sustancialmente, debido al incremento de la superficie de contacto con la solución. Además, la absorción progresiva de sólidos de sacarosa en las rodajas de 5 mm pudo haber resultado en la formación de una capa sub-superficial de solutos, que interferiría con el gradiente de concentración a través de la interface producto-solución y actuaría como una barrera contra la eliminación de agua y absorción de sólidos.

4.2 CINÉTICAS EXPERIMENTALES Y SIMULADAS DE DO PARA GANANCIA DE SÓLIDOS CON SACAROSA AL 35, 50 Y 65 % EN BETABEL FRESCO.

Las cinéticas de GS experimentales y simuladas con el modelo Page de rodajas de betabel sometidas a DO con solución de sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores, se muestran en la figura 11, la cual mostró una tendencia similar a la PA, dado que la mayor GS se obtuvo en los primeros 100 min para las rodajas de 1 mm y 150 min para las de 5 mm de espesor, a partir de ese momento un aumento en el tiempo no presentó cambios considerables en la GS, estos resultados concuerdan con los reportados por Singh et al. (2007) y Rosas-Mendoza et al. (2011), los cuales mencionaron que con la progresión del tiempo, el potencial osmótico para las transferencias de humedad y de soluto disminuyen debido a los cambios estructurales causados por la pérdida rápida de agua y la absorción de sólidos cerca de la superficie, lo que llevó a la compactación de estas capas superficiales y al aumento de la resistencia a la transferencia de masa de agua y sólidos. Asimismo, Azoubel y Murr (2004) reportaron que el incremento en la PA y GS con soluciones concentradas, fue debida a la diferencia entre el alimento y la alta concentración de la solución osmótica, la cual incrementó la velocidad de difusión de soluto y el intercambio de agua con la solución osmótica.

Los valores experimentales de GS para las rodajas de 1 mm de espesor a 35% de sacarosa fueron de 0.10, 0.15 y 0.23 g de sólidos/g de muestra fresca. Para la concentración de 50% se obtuvieron valores de 0.19, 0.30 y 0.31 de sólidos/g de muestra fresca y para 65% la GS fue de 0.21, 0.25 y 0.34, todas las concentraciones a las temperaturas de 30, 45 y 60 °C, respectivamente, de igual modo las rodajas de 5 mm de espesor tuvieron una GS para 35% de sacarosa de 0.03, 0.13 y 0.23 de sólidos/g de muestra fresca, a 50% fueron de 0.05, 0.09 y 0.18 de sólidos/g de muestra fresca y para 65% de sacarosa los valores de GS fueron de 0.06, 0.10 y 0.30 de sólidos/g de muestra fresca, a las temperaturas de 30, 45 y 60 °C, respectivamente, observándose una tendencia similar a la PA. La correlación entre las cinéticas experimentales y simuladas de GS fueron obtenidas por medio del

coeficiente de regresión o determinación (R^2), obteniendo un valor promedio de todos los tratamientos con una $R^2 = 0.9243$, cuyo valor indicó que el modelo de Page predijo adecuadamente el comportamiento experimental de la GS en las cinéticas de DO de las rodajas de betabel de 1 y 5 mm de espesor.

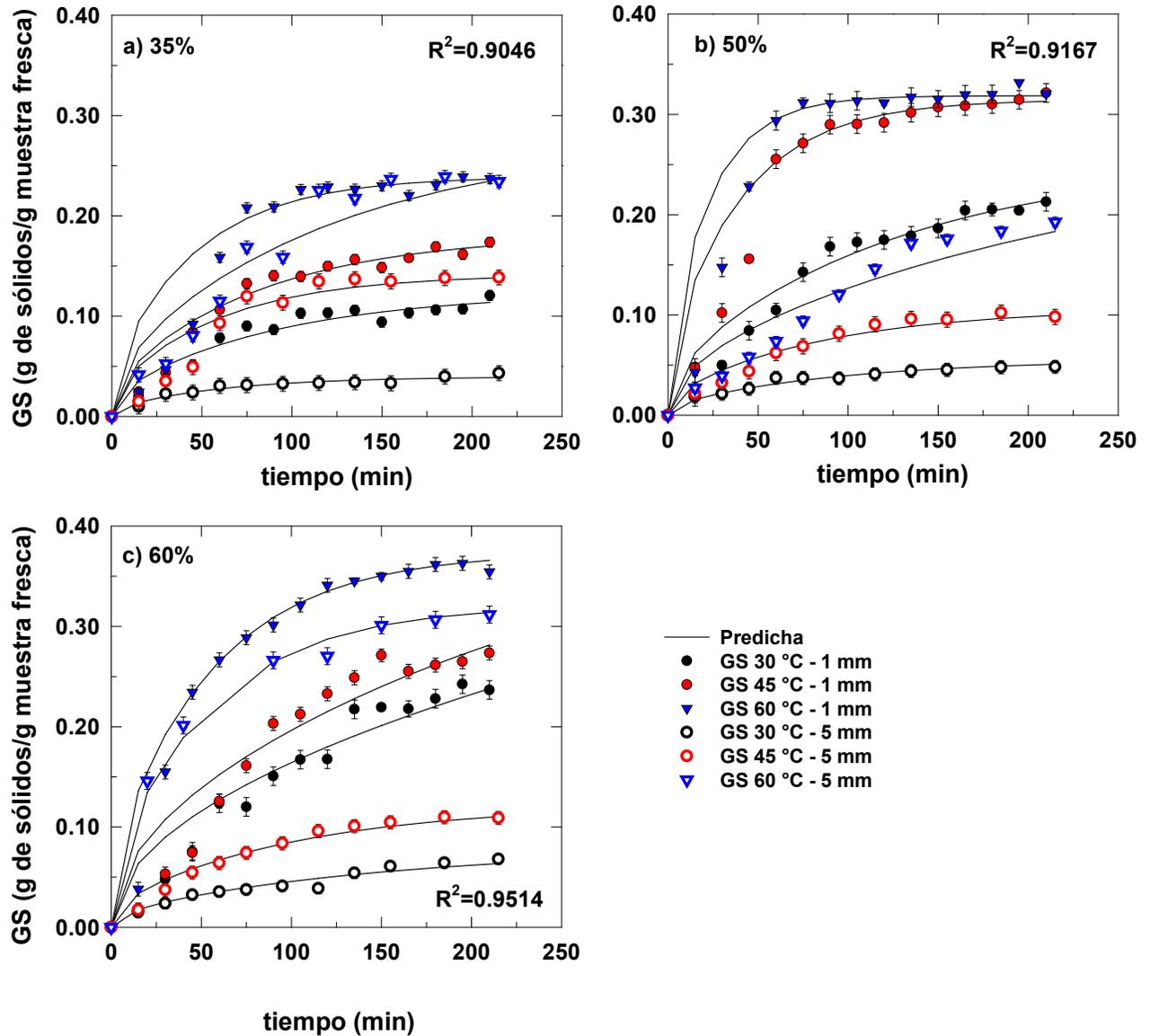


Figura 11. Cinéticas experimentales y simuladas de DO para ganancia de sólidos: a) 35, b) 50 y c) 65% de sacarosa a diferentes temperaturas y espesores.

Como fue evidente el aumento de GS presentó un comportamiento similar a la PA, debido al incremento de la concentración de sacarosa y la temperatura de la solución osmodeshidratante, obteniéndose la mayor GS en las concentraciones de 50 y 65% de sacarosa a las temperaturas de 45 y 60 °C en ambos espesores. Sin embargo, se presentó una mayor GS en las rodajas de 1 mm que en las rodajas de 5 mm, lo cual fue atribuido a lo ya mencionado en la PA, la proporción de células que estuvieron en contacto con la solución osmótica aumentaron sustancialmente con la disminución del espesor por el incremento de la superficie de contacto con la solución osmótica (Lewicki y Porzecka-Pawlak, 2005). En general, la PA y GS está directamente relacionada con la concentración del agente osmótico, la temperatura del proceso y el espesor de la muestra, tal como ya ha sido descrito anteriormente y como se apreció en la difusividad efectiva tanto del agua como del soluto posteriormente (Falade et al., 2007; Mendoza y Schmalko, 2002 y İspir y Toğrul, 2009). Debido a que la mayor PA y GS se produjo a concentraciones de 50 y 65%, en temperaturas de 45 y 60 °C respectivamente para los dos espesores, obteniéndose los mejores valores en las rodajas de 1 mm, éstas fueron seleccionadas para finalizar el proceso de secado en el secador RW.

4.3 DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL AGUA Y DEL SOLUTO.

Desde el punto de vista de las operaciones unitarias, un tratamiento con DO es un típico procedimiento de contacto sólido-líquido. Sin embargo, el estudio detallado de este proceso para vegetales y frutas involucra características inusuales tales como la composición heterogénea del material, el significativo encogimiento del tejido y el comportamiento semipermeable de las membranas celulares (Mauro et al., 2003). Recientes estudios han llevado a cabo intentos para entender el mecanismo de transporte a través del tejido complejo del vegetal. El fenómeno de la DO puede ser modelado por los fundamentos de la transferencia de masa que describen el origen de las fuerzas difusivas que están involucradas y el control de estos procesos (Kaymak-Ertekin y Sultanoglu 2000). Este proceso es generalmente representado por la segunda Ley de Fick que se muestra en la ecuación 4, el cual

ha sido empleado por algunos autores debido a que es el modelo fenomenológico que representa los mecanismos de difusión (Ochoa y Ayala, 2005).

4.3.1 DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL AGUA EN LA DO DEL BETABEL FRESCO EMPLEANDO SACAROSA AL 35, 50 Y 65%.

El coeficiente de difusividad efectiva de agua (De_a) de rodajas deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores, se muestran en la tabla 5. Los valores estimados de De_a oscilaron en un intervalo de 9.9385×10^{-08} a 3.0147×10^{-09} m^2/s , donde el coeficiente de determinación R^2 mostró valores promedio de 0.9851, indicando alta correlación con los valores experimentales, por lo que el modelo de Fick para el ajuste de estas difusividades fue apropiado tal como lo mencionan Azarpazhooh y Ramaswamy (2010). La desviación media del error (DME) tuvo valores menores a 0.0195. Se observó que la difusividad fue dependiente de la concentración y temperatura de la solución osmótica, encontrándose que a mayor concentración y temperatura, los valores de difusividad se incrementaron habiendo diferencia significativa en la mayoría de ellos ($p < 0.05$). Sin embargo, disminuyeron con el aumento del espesor debido probablemente a que en las capas internas de la rodaja de 5 mm la transferencia de agua se vio obstaculizada por la penetración o ganancia de sólidos. Los altos valores de difusividad de las rodajas de 1 mm de espesor sugirió que la transferencia de agua fue más rápida que en las de 5 mm presentándose diferencia significativa entre ellos ($p < 0.05$), lo cual fue corroborado con las cinéticas de PA donde se constató que las rodajas de 1 mm fueron las que alcanzaron el equilibrio más rápido en comparación con las de 5 mm.

La dependencia de la difusividad efectiva con la concentración fue asociada con los cambios en las propiedades físicas del alimento, tales como la porosidad y la permeabilidad celular; el estrés osmótico provocado resultó en la desintegración celular promoviendo la pérdida de contacto entre las membranas exteriores y la pared celular interna, dando como resultado un incremento en la difusividad con el

incremento de la concentración de la solución (Rastogi et al., 2000, 2002). Estos resultados son parecidos a los reportados por Singh et al. (2007) quienes verificaron que durante la deshidratación osmótica de zanahoria en soluciones ternarias de sacarosa/NaCl/agua, la difusividad efectiva de agua aumentó con el incremento de la temperatura y la concentración de sal en la solución osmótica. De igual forma İspir y Toğrul, (2009) encontraron que los valores de difusividad efectiva y coeficientes de transferencia de masa de la pérdida de agua y solutos son dependientes de la concentración y la temperatura de la solución.

Tabla 5. Coeficientes de difusividad efectiva de agua de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.

Concentración (%)	Espesor (mm)	Difusividad de agua (m ² /s)		
		Temperatura de la solución (°C)		
		30	45	60
35	1	4.9093 x 10 ⁻⁰⁸ a,A	5.1922 x 10 ⁻⁰⁸ ab,A	7.4071 x 10 ⁻⁰⁸ c,A
	5	4.4333 x 10 ⁻⁰⁹ a,B	7.4155 x 10 ⁻⁰⁹ b,B	9.0133 x 10 ⁻⁰⁹ c,B
50	1	4.6725 x 10 ⁻⁰⁸ a,A	4.2717 x 10 ⁻⁰⁸ a,A	4.8891 x 10 ⁻⁰⁸ a,A
	5	3.0147x 10 ⁻⁰⁹ a,B	5.7260 x 10 ⁻⁰⁹ b,B	5.2584 x 10 ⁻⁰⁹ b,B
65	1	5.5812 x10 ⁻⁰⁸ a,A	7.4214 x 10 ⁻⁰⁸ b,A	9.9385 x 10 ⁻⁰⁸ c,A
	5	3.9945 x10 ⁻⁰⁹ a,B	4.5866 x 10 ⁻⁰⁹ a,B	4.4677 x 10 ⁻⁰⁹ a,B

Los resultados son el promedio de dos determinaciones. Letras diferentes en la misma columna mayúsculas (espesor) y fila minúsculas (temperatura) indican diferencia significativa (p<0.05).

Por su parte, Kaymak-ertekin y Sultanoglu (2000), deshidrataron manzanas con soluciones de sacarosa, dextrosa y la mezcla de ambos azúcares, mostrando que la difusividad efectiva de agua se incrementó considerablemente con el aumento de la temperatura y también con el incremento de la concentración.

4.3.2 DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL SÓLIDO EN LA DO DEL BETABEL FRESCO EMPLEANDO SACAROSA AL 35, 50 Y 65%.

El coeficiente de difusividad efectiva de soluto (De_s) de rodajas deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores, se muestran en la tabla 6. Los valores estimados de De_s por la Ley de Fick se obtuvieron en un intervalo de 4.6488×10^{-08} a 5.7513×10^{-11} m²/s, obteniéndose un coeficiente de determinación promedio (R^2) de 0.9243 de ajuste con los resultados experimentales, mientras que la desviación media del error (DME) tuvo valores menores a 0.0476. Los valores de difusividad de solutos fueron menores que los de la difusividad de agua, esto fue debido a que como mencionaron Bakalis y Karathanos (2005), en la estructura de los alimentos tratados con DO se absorben solutos los cuales forman complejos o enlazan iones de la solución disminuyendo la difusividad. Este comportamiento fue reportado por García-Toledo et al. (2015), quienes deshidrataron cubos de jengibre con soluciones de sacarosa al 35, 50 y 60% a diferentes temperaturas, encontrando menores valores de difusividad de soluto comparados con la difusividad de agua, indicando que este comportamiento está relacionado con la baja ganancia de sólidos en las muestras.

Por otra parte, los resultados de De_s disminuyeron con el aumento del espesor de la rodajas de betabel mostrando diferencias significativas ($p < 0.05$) con un comportamiento similar a los valores de De_a , esto se atribuyó a la obstrucción del poro de las capas superficiales con sacarosa en las rodajas de 5 mm que limitaron la difusión en las capas internas, siendo estos coeficientes de difusión dependientes de la concentración y la temperatura de la solución. Por el contrario que la De_a , el incremento de la concentración disminuyó los valores de De_s , mientras que con el aumento de la temperatura los valores de difusividad aumentaron, debido a que un incremento de la temperatura produjo cambios en la permeabilidad y fluidez de la solución osmótica (García-Toledo et al., 2015). Este comportamiento también puede ser explicado por la formación de un gradiente de concentración alrededor del tejido debido al azúcar, la cual dificultó la entrada en el producto o por la reducción de la permeabilidad celular durante la plasmólisis (Sacchetti et al., 2001). De igual

manera, el encogimiento interno pudo provocar cambios en la estructura interna del producto que afectaron a la difusividad de masa como fue reportado por da Silva et al. (2014).

Tabla 6. Coeficientes de difusividad efectiva de solutos de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.

Concentración (%)	Espesor (mm)	Difusividad de sólidos (m ² /s)		
		Temperatura de la solución (°C)		
		30	45	60
35	1	4.1453 x 10 ⁻⁰⁸ a,A	4.6488 x 10 ⁻⁰⁸ b,A	2.0340 x 10 ⁻⁰⁸ c,A
	5	1.0986 x 10 ⁻⁰⁹ a,B	1.2051 x 10 ⁻⁰⁹ a,B	2.0747 x 10 ⁻⁰⁹ a,B
50	1	2.6167 x 10 ⁻⁰⁸ a,A	2.9124 x 10 ⁻⁰⁸ a,A	1.0300 x 10 ⁻⁰⁸ a,A
	5	7.7535 x 10 ⁻¹⁰ a,B	2.4018 x 10 ⁻⁰⁹ b,B	4.0790 x 10 ⁻⁰⁹ c,B
65	1	1.6141 x 10 ⁻⁰⁸ a,A	2.4647 x 10 ⁻⁰⁸ ab,A	4.3055 x 10 ⁻⁰⁸ c,A
	5	5.7513 x 10 ⁻¹¹ a,B	3.9446 x 10 ⁻¹⁰ b,B	1.7298 x 10 ⁻⁰⁹ c,B

Los resultados son el promedio de dos determinaciones. Letras diferentes en la misma columna mayúsculas (espesor) y fila minúsculas (temperatura) indican diferencia significativa (p<0.05).

Resultados semejantes fueron reportados por Monnerat et al. (2006), quienes compararon los perfiles de concentración de agua y soluto durante la deshidratación osmótica de manzanas (*Fuji variety*) encontrando que el perfil de agua evolucionó más que el perfil de sacarosa, llegando a capas más profundas del tejido de manzana, siendo resultado de un movimiento preferencial del agua de la fruta a la solución en lugar de la afluencia del soluto de la solución a la fruta. Por otra parte, Falade et al. (2007), calcularon las difusividades efectivas de agua y solutos en sandía con diferentes concentraciones de sacarosa, temperaturas y espesores, encontrando valores que oscilaron de 1.030 x 10⁻⁰⁸ a 3.549 x 10⁻⁰⁹ para la pérdida de agua y de 1.117 x 10⁻⁰⁸ a 8.540 x 10⁻⁰⁹ m²/s para la ganancia de sólidos, observando que la difusividad de agua y solutos se incrementaba con la concentración y temperatura y disminuía con el incremento del espesor;

encontrando que el coeficiente de transporte se incrementó con un aumento de la concentración de la solución debido a los cambios en las propiedades físicas de los alimentos tales como la porosidad y la permeabilización celular (Rastogi y Raghavarao, 2004). Los valores bajos de difusividad de solutos obtenidos en este trabajo fueron favorables porque se limitó la absorción de sacarosa, mientras que se favoreció la pérdida de agua.

4.4 CINÉTICAS DE SECADO DE BETABEL POR RW

Como ya se mencionó anteriormente, las rodajas de betabel de 1 mm de espesor fueron secadas en el secador RW por tener mayor PA y GS en las diferentes condiciones de operación de DO que las de 5 mm. Además, también fue debido a que este secador requiere de espesores delgados en los productos a deshidratar para obtener una mayor eficiencia en la evaporación del agua. En la figura 12 se muestran las cinéticas experimentales de secado por RW de betabel fresco a las temperaturas de 60 y 85 °C, donde se observó que el secado del betabel sin DO estuvo influenciado por la temperatura del RW, encontrándose que para el secado a 60 y 85 °C se requirieron de 100 y 40 min respectivamente para alcanzar el equilibrio. Los anterior establece que empleando RW en el secado de betabel se tuvo un ahorro de tiempo de secado de 150% (60 min de diferencia) en comparación con el secado convectivo. Como era de esperarse el menor tiempo fue observado a 85 °C, esto fue atribuido a que con el incremento de la temperatura se provocó un aumento en la velocidad de secado y por lo tanto la reducción en el tiempo de secado (Doymaz, 2004). Por otro lado, Park et al. (2002) y Shi et al. (2008) encontraron que el incremento de la temperatura indujo a un incremento en la energía térmica, lo cual acelera el movimiento de las moléculas de agua y da lugar a mayor difusividad de humedad. Estos resultados presentaron una tendencia similar a la encontrada por Castoldi et al. (2015), quienes estudiaron el secado de pulpa de tomate por RW empleando diferentes temperaturas del agua en el RW (65, 75, 85 y 95 °C) y espesores de 2 y 3 mm, encontrando que el tiempo más corto de secado fue observado para la pulpa de tomate con menor espesor secada con la

temperatura más alta, indicando que la radiación infrarroja emitida por el agua caliente contribuyó a la transferencia de agua durante el secado. De igual forma Abul-Fadl y Ghanem (2011), deshidrataron puré de tomate por secado convectivo a 60 °C y secado por RW con temperaturas del agua de 60, 75 y 90 °C y espesores de 1 y 2 mm, encontrando que el RW eliminó rápidamente el agua del puré de tomate, requiriendo un tiempo de 75, 60 y 40 min respectivamente, mientras que el secado convectivo requirió de 16 h, atribuyendo esta amplia variación del tiempo al mecanismo de secado en el RW, en el cual la transferencia de calor se da por la radiación infrarroja a través de la ventana que se abre sobre el material húmedo, por lo que se produce una evaporación en todo el sistema. A medida que el alimento se seca, la ventana de radiación infrarroja se cierra y la transferencia de calor se da por conducción evaporando el agua restante en el alimento. Es por ello que el secado por RW requiere de menor tiempo de secado lo cual podría darle múltiples ventajas a los productos deshidratados.

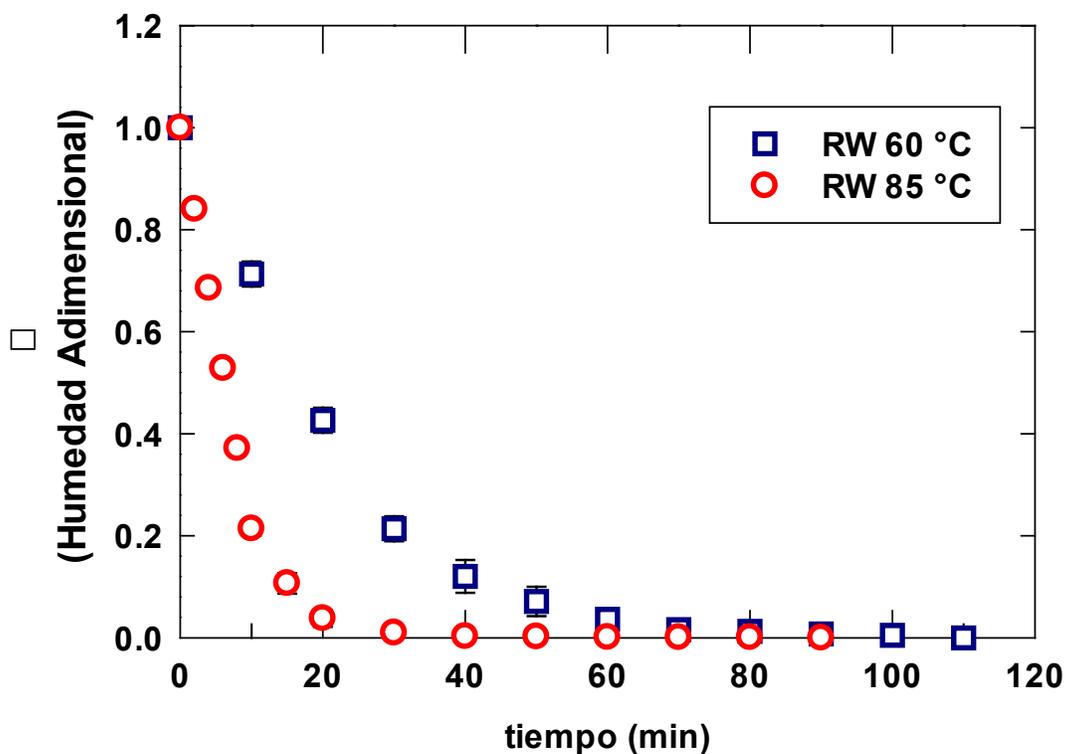


Figura 12. Cinéticas experimentales de secado por RW de betabel fresco a diferentes temperaturas.

También Abbasid et al. (2015), realizaron el secado de rodajas de tomate por secado con aire caliente y RW a 75 y 90 °C, encontrando que el tiempo requerido en el secador con aire caliente fue de 140 y 120 min, mientras que en el secado RW tomó 140 y 70 min a las temperaturas ya mencionadas, respectivamente. Estos autores confirmaron que la razón por la que el RW tomó menos tiempo en el secado a 90 °C fue debido a que la radiación infrarroja del agua caliente se transfirió directamente a las muestras y que en este método de secado la transferencia de calor se presentó también por conducción además de la radiación, por lo tanto el tiempo de secado se redujo considerablemente, no así a 75 °C.

Otras investigaciones con comportamientos similares fueron realizadas por Ochoa-Martínez et al. (2012) quienes encontraron que el secado por RW tuvo la capacidad de secar rebanadas de mango reduciendo el tiempo de exposición a temperaturas relativamente altas. Mientras que Hernández-Santos et al. (2015) compararon el secado con RW y secado convectivo en rodajas de zanahoria, concluyendo que se produjo una reducción del tiempo de secado de 26 a 51% en el RW en comparación con el secado convectivo. Por otro lado, Nindo et al. (2003b) compararon las cinéticas de secado de espárragos por los métodos de secado en RW y charolas, reportando un tiempo de residencia de 4.5 min y 3.5 h respectivamente, mencionando que el secado en el RW fue más rápido debido a la alta transferencia de calor y masa que tiene lugar en la delgada película del RW, además de que el delgado espesor de la muestra facilitó el proceso de secado, de igual modo Caparino et al. (2012) deshidrató puré mango en el RW con una temperatura del agua de 97 °C y un espesor de 0.5-0.7 mm, reportando un tiempo de secado de 3 min aproximadamente. Conductas similares fueron encontradas por Abonyi et al. (2002) en el secado de puré de zanahoria y fresas, así como en el puré de calabaza por Nindo et al. (2003a), estos resultados fueron menores a los encontrados en este trabajo, lo cual fue atribuido a que el betabel muestra una estructura más sólida y compleja que el puré (producto semisólido) utilizado en esos trabajos. Por otro lado, los estudios antes mencionados fueron realizados con un proceso de secado de RW continuo. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo demostraron la

habilidad del secador RW por lotes para deshidratar rodajas de betabel de 1 mm de espesor en un tiempo relativamente corto en comparación con el secado convectivo empleado como referencia.

4.5 CINÉTICAS EXPERIMENTALES DE SECADO COMBINADO DO-RW DE BETABEL FRESCO.

El contenido de humedad inicial de las rodajas de betabel fresco fue de 88.41% (b.h) correspondiente a un contenido de humedad 7.63 g de agua/g de sólidos secos. Estas rodajas fueron pretratadas inicialmente a las condiciones establecidas de DO, encontrándose que el tratamiento de DO redujo parcialmente el contenido de agua de las rodajas betabel, estos valores se muestran en la tabla 7. Los resultados mostraron que la concentración de la solución osmodeshidratante tuvo influencia en la disminución del contenido de humedad de las rodajas de betabel al final de la DO, donde el comportamiento indicó que dicho contenido de humedad disminuyó con el incremento de la concentración de la solución osmótica, alcanzando una disminución del porcentaje de humedad mayor al 50% en la concentración de 35% de sacarosa y de un 73 a 85% en las concentraciones de 50 y 65% de sacarosa a las temperaturas de 45 y 60 °C. Tal como se reflejó en las cinéticas experimentales de PA mostradas anteriormente, donde se mencionó que un aumento de la concentración de la solución osmótica incrementó el potencial osmótico para la eliminación de agua del alimento. Estos resultados presentaron una tendencia similar a los obtenidos por Kowalski y Mierzwa (2011) cuando deshidrataron osmóticamente cubos de zanahorias empleando glucosa al 20, 40 y 60%, demostrando que el incremento de la concentración de la solución osmótica tuvo influencia sobre el contenido de agua eliminada; por otro lado, Kowalski et al. (2013) encontraron que la concentración alta de sacarosa causó una reducción significativa del contenido de humedad al final del proceso de DO en rodajas de betabel y plátano. Asimismo Prothon et al. (2001) encontraron que el contenido de humedad fue reducido después del tratamiento osmótico de 89 a 71% empleando soluciones de sacarosa al 50% en cubos de manzanas.

Tabla 7. Contenido de humedad de las rodajas de betabel al final de la DO de las rodajas de 1 mm de espesor.

Sacarosa (%)	Temperatura (°C)	Humedad al final de la DO (g de agua/g de s.s)		% de humedad reducido
Testigo		7.6304	± 0.17	****
35	30	3.1808	± 0.03	58.3142
35	45	2.9235	± 0.17	61.6857
35	60	2.0794	± 0.10	72.7488
50	30	2.0599	± 0.03	73.0044
50	45	1.7736	± 0.03	76.7556
50	60	1.6021	± 0.05	79.0035
65	30	1.4757	± 0.05	80.6608
65	45	1.2158	± 0.02	84.0660
65	60	1.0833	± 0.02	85.8034

Los resultados son un promedio de dos repeticiones.

El contenido de humedad de las rodajas de betabel al final del proceso de DO mostrados en la tabla 5, fueron simultáneamente los valores iniciales de contenido de humedad en el secado por RW, dichos valores fueron convertidos en contenido de humedad adimensional mediante la ecuación 5 para obtener una mejor apreciación del comportamiento de las cinéticas. En la figura 13 se muestran las cinéticas experimentales de secado en RW a 60 y 85°C de las rodajas de betabel fresco de 1 mm de espesor sin y con pretratamiento de DO a diferentes concentraciones de sacarosa y temperaturas. En ésta, se observó que al principio del proceso de secado se presentó una disminución rápida del contenido de humedad, tanto para las muestras sin y con pretratamiento, esto fue provocado porque la velocidad de secado fue más alta al principio del proceso y a medida que avanzó el tiempo, esta velocidad disminuyó con la reducción de la humedad en ambas condiciones secado en el RW. La reducción de la velocidad de secado fue debida a la disminución de la porosidad provocada por el encogimiento que fue más pronunciado con el avance del proceso de secado, este encogimiento incrementó la resistencia para el movimiento del agua conduciendo a una disminución de la velocidad de secado en la etapa final del mismo (Singh y Gupta, 2007).

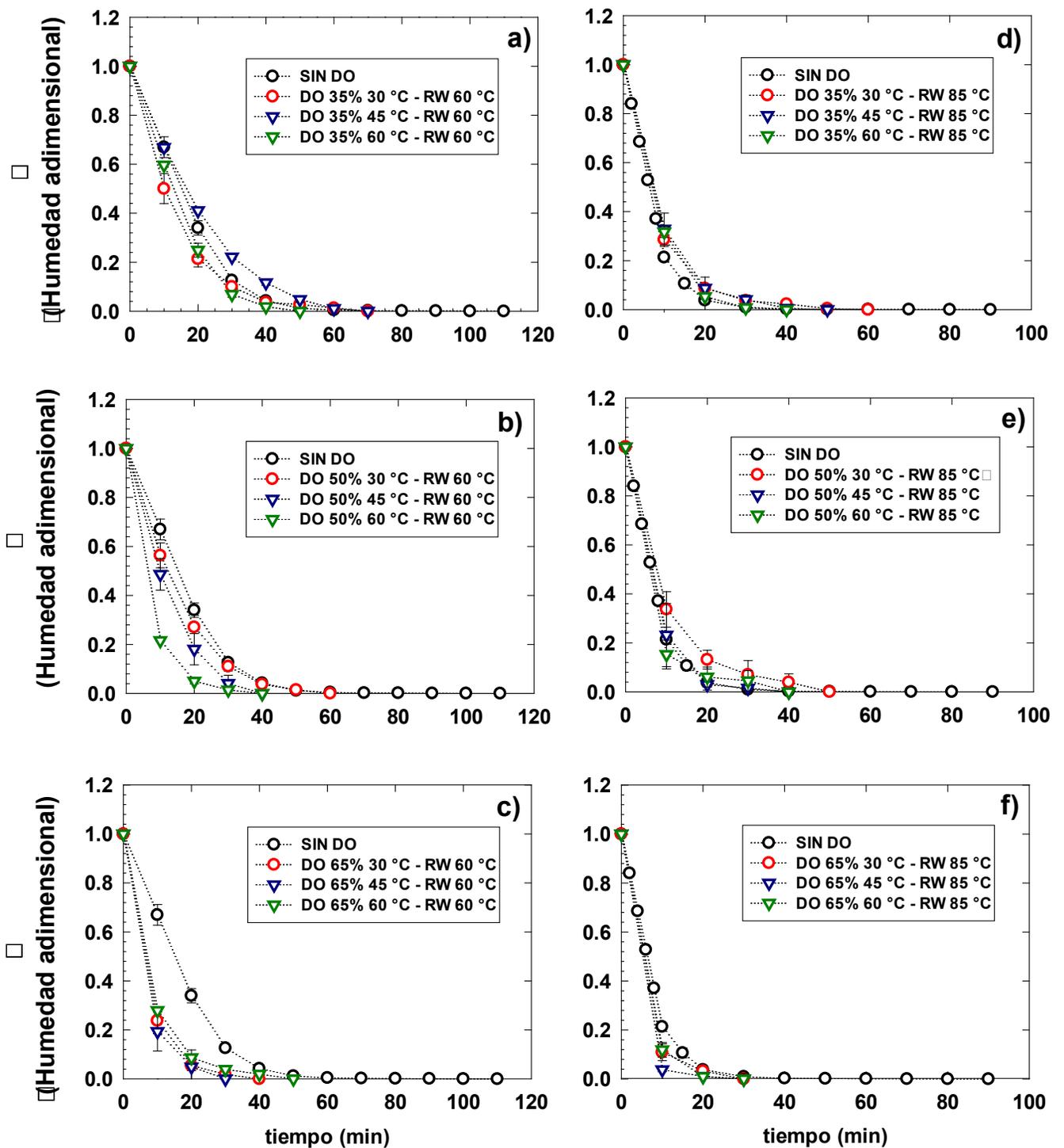


Figura 13. Cinéticas experimentales de secado en RW a 60 y 85 °C de rodajas de betabel de 1 mm de espesor fresco con y sin pretratamiento de DO a diferentes concentraciones de sacarosa y temperaturas.

Las rodajas de betabel con pretratamiento de DO y secadas a 60 °C en el RW lograron una disminución del tiempo de secado con respecto al betabel fresco, esto fue debido en primera instancia a que el contenido de humedad de las rodajas tratadas con DO fue menor que el betabel sin pretratamiento, requiriéndose de tiempos de secado de aproximadamente de 70, 60 y 50 min para 35, 50 y 65% de sacarosa como se muestra en la figura 13a, 13b y 13c. Fue evidente que este tiempo disminuyó a medida que se aumentó la concentración y temperatura de la solución durante la DO, excepto a 65% y 60 °C, donde el tiempo fue mayor comparado con las temperaturas más bajas (30 y 45 °C), esto fue atribuido a que en este tratamiento la GS de la rodajas fue mayor, por lo que estos sólidos obstaculizaron la eliminación de agua en la etapa final del proceso de secado en el RW. Esta resistencia fue consecuencia de una reducción de la porosidad del tejido debido a la excesiva infiltración o la posible formación de una capa periférica de sacarosa, lo que condujo a la que la transferencia de agua haya sido obstruida, por lo que para eliminarla se requirió de más tiempo de secado. Los resultados mostrados presentaron un comportamiento parecido a los encontrados por Wang et al. (2010), quienes demostraron que el tratamiento osmótico con soluciones de sacarosa previo al secado por microondas-liofilización mejoró la velocidad de secado de rodajas de papa y con ello se disminuyó el tiempo de secado.

Sin embargo, cuando la concentración incrementó de 40 a 50%, la velocidad de secado no mejoro más, por lo que el tiempo tampoco disminuyó, debido a la alta absorción de sacarosa en altas concentraciones. Esta tendencia también fue reportada por Kowalski y Łechtańska (2015), quienes encontraron que la transferencia de solutos y la cristalización sobre la superficie de la muestra bloquearon la salida del agua.

Teóricamente, las muestras con DO podrían secarse más rápido debido al contenido de humedad más bajo que en la muestra sin DO (Kowalski y Mierza, 2011). Sin embargo, las rodajas pretratadas con DO a 35, 50 y 65% de sacarosa y secadas en el RW a 85 °C como se muestran en las figuras 13d, 13e y 13f, no

presentaron una disminución de tiempo significativa cuando fueron pretratadas con 35 y 45% de sacarosa, presentándose una disminución considerable del tiempo de secado a 65%, esto fue atribuido a que con el aumento de la temperatura en el RW de 60 a 85 °C se provocó una rápida pérdida de agua al inicio del secado, lo cual contribuyó a la deformación y compactación de las membranas y por lo tanto el flujo de agua se vio obstaculizado haciendo que el tiempo de secado se extendiera más en la etapa final de secado en el RW a la temperatura de 85 °C. Además de que la infusión de sacarosa en el interior del tejido causó probablemente la cristalización en algunas partes de la capas superficiales (Prothon et al., 2001). Muchos autores han mostrado que después de cierto tiempo de secado, el producto se vuelve más denso, más duro y con la superficie más endurecida, lo cual dificulta la difusión de la humedad (Doymaz 2007; Marquez y De-Michelis 2009), que aunado a la ganancia de sólidos durante la DO dificultan aún más la evaporación de agua. Este comportamiento fue encontrado por Kowalski et al. (2013) en muestras de betabel pretratadas con baja concentración de sacarosa, donde el tiempo de secado fue comparable o ligeramente parecido al secado de muestras sin tratamiento. De igual forma Singh y Gupta, (2007) encontraron que el tratamiento con DO no disminuyó el tiempo de secado convectivo de cubos de zanahorias tratados con NaCl al 10%, jarabe de sacarosa con 55 °Brix y una mezcla de sacarosa a 55 °Brix con NaCl, por el contrario lo incrementó como consecuencia de la resistencia para eliminar el agua, ocasionado por la ganancia de solutos durante el pretratamiento de DO. De igual manera Mandala et al. (2005) demostraron que la impregnación superficial de azúcar durante la osmosis favoreció la cristalización de azúcares en algunas partes de las capas del tejido de manzana, formando una barrera para el movimiento de agua durante el secado. Probablemente esto haya ocurrido en las muestras de betabel tratadas a baja concentración de sacarosa. Otros estudios de deshidratación osmótica de frutas y vegetales en soluciones concentradas con una etapa final de secado han permitido alcanzar valores de humedad que garantizan la estabilidad del producto final y el mantenimiento de las características sensoriales del alimento. La temperatura empleada es muy importante para la deshidratación, pero está limitada por la sensibilidad del betabel y la calidad esperada del producto

final. Por lo tanto, se analizaron las propiedades físicas y químicas del betabel después de los tratamientos a los que fueron sometidos en este trabajo.

4.6 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL BETABEL DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE, SECADO EN RW Y POR EFECTO COMBINADO DO-RW.

El secado es uno de los métodos ampliamente usados para la preservación de frutas y vegetales. Durante el secado de alimentos, la eliminación de agua (un componente vital para mantener la estructura y funcionalidad íntegra) de membranas biológicas conduce a la separación de fases laterales de proteínas y lípidos que dan lugar a la agregación de proteínas, causando cambios físicos y químicos en el tejido de vegetales. Estos cambios físicos y químicos en el tejido se derivan principalmente de los gradientes de concentración y la temperatura (esto es temperatura alta, contacto con el oxígeno y el aumento de la concentración de solutos), los cuales son macroscópicamente pronunciados por la forma y la distorsión del tamaño, la retención del color y la modificación de las propiedades mecánicas que afectan en gran medida la habilidad de rehidratación de material seco (Lewicki & Pawlak, 2003).

4.6.1 RESULTADOS DE COLOR EN EL BETABEL DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE.

La tabla 8 muestra los resultados de los parámetros de color de las rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con solución de sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores. En ésta, se muestra que todos los tratamientos mostraron cambios en los parámetros de Luminosidad, Cromaticidad, ángulo hue y diferencia total de color (*L, *C, °h y ΔE , respectivamente). La luminosidad que se ha sido utilizada por muchos autores como indicador de pardeamiento de frutas secas (Pott et al., 2005) presentó una disminución en todos los tratamientos de DO en ambos espesores, esto fue atribuido a la lixiviación de

los pigmentos del betabel que migraron hacia la solución osmótica durante los flujos de transferencia de masa.

Tabla 8. Parámetros de color de rodajas de betabel de 1 y 5 mm de espesor pretratadas osmóticamente a diferentes concentraciones de sacarosa y temperaturas.

1 mm de espesor				
TRAT.	L*	C*	°h	ΔE
Testigo	26.78 ± 1.24^a	21.13 ± 1.82^{a,b,c}	20.05 ± 0.82^a	0.00 ± 0.00
T1	24.80 ± 1.05 ^{b,c}	26.42 ± 3.70 ^d	18.69 ± 1.57 ^{a,b,c}	6.57 ± 3.92 ^{a,b,c,d}
T2	23.96 ± 0.08 ^{c,d,e}	24.04 ± 1.67 ^{b,c,d}	18.80 ± 0.67 ^{a,b,c}	4.96 ± 1.16 ^{a,b,c,d}
T3	22.99 ± 0.44 ^{d,e,f}	18.10 ± 0.64 ^{a,e}	14.84 ± 0.44 ^{d,e,f}	5.35 ± 1.72 ^{a,b,c,d}
T4	25.52 ± 0.99 ^{a,b,c}	24.81 ± 3.51 ^{b,c,d}	18.67 ± 1.37 ^{a,b,c}	4.10 ± 2.86 ^{a,b,c}
T5	24.46 ± 0.72 ^{b,c,d}	20.66 ± 2.14 ^{a,b}	17.63 ± 1.54 ^{a,b,c,d}	3.68 ± 2.30 ^{a,b}
T6	25.45 ± 0.44 ^{a,b,c}	22.66 ± 2.72 ^{b,c,d}	16.06 ± 1.06 ^{c,d,e}	2.80 ± 0.47 ^a
T7	24.48 ± 0.80 ^{b,c,d}	23.38 ± 2.43 ^{b,c,d}	18.47 ± 1.38 ^{a,b,c}	4.48 ± 1.61 ^{a,b,c}
T8	25.70 ± 1.41 ^{a,b}	25.13 ± 4.97 ^{b,c,d}	19.46 ± 1.54 ^{b,c}	4.54 ± 2.63 ^{a,b,c}
T9	22.39 ± 0.60 ^{e,f,g}	16.12 ± 1.13 ^{e,f}	12.44 ± 1.71 ^f	7.17 ± 1.01 ^{a,b,c,d}
5 mm de espesor				
TRAT.	L*	C*	°h	ΔE
Testigo	26.78 ± 1.24^a	21.13 ± 1.82^{a,b,c}	20.05 ± 0.82^a	0.00 ± 0.00
T10	19.22 ± 0.96 ^{j,k}	11.89 ± 0.06 ^{f,g,h,i}	16.14 ± 1.07 ^{c,d,e}	12.02 ± 1.59 ^{e,f}
T11	20.04 ± 1.68 ^{h,i,j}	14.78 ± 4.17 ^{e,f,g,h}	16.66 ± 1.63 ^{b,c,d,e}	9.39 ± 2.98 ^{d,e}
T12	17.93 ± 1.19 ^k	5.72 ± 2.16 ^j	18.89 ± 5.50 ^{a,b,c}	17.81 ± 2.84 ^g
T13	19.70 ± 1.17 ^{i,j}	11.46 ± 1.43 ^{g,h,i}	16.45 ± 1.45 ^{b,c,d,e}	12.07 ± 3.62 ^{e,f}
T14	19.70 ± 0.43 ^{i,j}	8.15 ± 2.11 ^{i,j}	14.12 ± 2.21 ^{e,f}	14.90 ± 3.86 ^{f,g}
T15	21.58 ± 0.63 ^{f,g,h}	14.48 ± 2.03 ^{e,f,g,h}	17.85 ± 0.34 ^{a,b,c,d}	8.59 ± 3.17 ^{c,d,e}
T16	21.02 ± 1.89 ^{g,h,i}	15.70 ± 1.07 ^{e,f,g}	17.89 ± 1.05 ^{a,b,c,d}	8.19 ± 1.31 ^{b,c,d,e}
T17	20.08 ± 1.06 ^{h,i,j}	11.25 ± 2.74 ^{h,i}	17.53 ± 0.19 ^{a,b,c,d}	11.99 ± 0.96 ^{e,f}
T18	18.98 ± 1.07 ^{j,k}	9.02 ± 4.12 ^{i,j}	16.84 ± 2.53 ^{b,c,d,e}	14.53 ± 6.02 ^{f,g}

Los resultados son el promedio de tres repeticiones. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

Se observó que con el incremento de la concentración y temperatura, el valor de L^* disminuyó, probablemente por el aumento de los gradientes de concentración que favorecieron la pérdida de agua hacia la solución osmótica acompañado de la lixiviación de los pigmentos antes mencionados. Los mejores resultados fueron observados en las rodajas de 1 mm de espesor que en las de 5 mm, lo cual pudiera estar relacionado con la ganancia de sólidos, que como ya se mencionó fue mayor en las rodajas de 1 mm de espesor, esta GS creó un efecto protector sobre los pigmentos del betabel. Los valores más altos de luminosidad para las rodajas de 1 mm fueron los obtenidos para los tratamientos que emplearon temperaturas de 30 y 45 °C en todas las concentraciones de sacarosa empleadas, siendo los tratamientos T4, T6 y T8 con valores de L^* de 25.52, 25.45 y 25.70 respectivamente, los que no presentaron diferencia significativa con respecto al testigo ($p < 0.05$). En cuanto a las rodajas de 5 mm se produjo una disminución de L^* más pronunciada que en las de 1 mm, obteniéndose valores de L^* de 21.58 a 17.93, los cuales mostraron diferencias significativas con respecto al testigo ($p < 0.05$) en todas las concentraciones y temperaturas empleadas, observándose que el aumento de la temperatura disminuyó significativamente ($p < 0.05$) estos valores de L^* en ambos espesores, lo cual está relacionado con un incremento en la translucidez de las muestras de betabel deshidratadas, debido a que el proceso de DO cambia la composición interna del alimento, esto conlleva a índices refractivos más homogéneos en el tejido, los cuales promueven la absorción de la luz contra la dispersión, resultando en productos que incrementan su transparencia (Chiral y Talens, 2005). Resultados con una tendencia similar fueron los encontrados por Abrao et al. (2013) quienes deshidrataron osmóticamente calabaza con diferentes concentraciones de sacarosa, encontrando que a medida que aumentaba la temperatura del proceso de DO, la luminosidad disminuía. Por otro lado, Almedida et al. (2015) también encontraron que L^* disminuyó con el incremento de la temperatura de la solución, indicando un ligero oscurecimiento después de proceso de DO, atribuyendo esto a que con el incremento de la temperatura se favorecen las reacciones químicas y enzimáticas de oxidación de compuestos fenólicos o incluso la reacción de Maillard entre azúcares reductores y aminoácidos, los cuales

promueven el oscurecimiento del producto, éste oscurecimiento puede estar relacionado a la formación de un complejo de azúcares con los pigmentos del betabel, produciendo un producto con un color más concentrado.

El valor de C^* es indicativo de la saturación de las muestras, en este trabajo las rodajas de 1 mm de espesor presentaron un ligero aumento en la cromaticidad en los tratamientos con mayor concentración de solución osmótica (50 y 65%), cuyos valores de C^* oscilaron entre 26.42 a 16.12, siendo los tratamientos T2 a T8 los que no presentaron diferencia significativa con el testigo ($p < 0.05$), este aumento se debió probablemente a la concentración de los pigmentos del betabel producido por la pérdida de agua en las rodajas, además que con el espesor de 1 mm el tiempo de deshidratación osmótica fue relativamente menor que en las de 5 mm, previniendo una menor lixiviación de los pigmentos. Por otro lado, las rodajas de 5 mm también presentaron una marcada disminución de este parámetro con el incremento de temperatura de la solución, siendo menores estos valores de C^* con respecto a las rodajas de 1 mm, los cuales se mantuvieron en un intervalo de 15.70 a 5.72, presentando diferencias significativas con respecto al testigo ($p < 0.05$) en todas las concentraciones y temperaturas, esto fue probablemente provocado por la GS que en las rodajas de 5 mm fue ligeramente menor que las rodajas de 1 mm, además de que el tiempo de deshidratación osmótica fue mayor para las rodajas de 5 mm, promoviendo una mayor lixiviación de estos pigmentos en las capas superficiales de la rodaja.

En cuanto al $^{\circ}h$ se presentó una disminución de este valor en todos los tratamientos y ambos espesores, observándose los mejores tratamientos en las rodajas de betabel de 1 mm de espesor, siendo éstas más parecidas al testigo ($p < 0.05$) que las de 5 mm. Los tratamientos T1, T2, T4, T5 Y T7 con valores de $^{\circ}h$ que fluctuaron entre 18.80 a 17.63 que corresponden a bajas temperaturas de la solución osmótica (30 y 45 °C) no presentaron diferencia significativa con respecto al testigo ($p < 0.05$). Los valores bajos de $^{\circ}h$ indican oscurecimiento (Singh, et al., 2010) por lo que las rodajas de 5 mm de espesor al presentar valores más bajos de $^{\circ}h$ comparados con

los de 1 mm, mostraron un pardeamiento que fue más pronunciado a altas temperaturas. Cabe mencionar que algunos tratamientos de 5 mm de espesor no presentaron diferencia significativa con el testigo ($p < 0.05$), esto fue a las concentraciones de 50 y 65% en los tratamientos T12, T15, T16 y T17, atribuyendo esto a que en esas concentraciones se presentaron las mayores ganancias de sólidos que como ya se mencionó pudieron haber tenido un efecto protector. La diferencia de color (ΔE), indicó que los tratamientos de 1 mm de espesor no mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo, cuyos valores fueron de 2.80 a 7.17, mientras que las de 5 mm mostraron valores de ΔE mayores a los obtenidos en las rodajas de 1 mm (8.19 a 14.90) siendo significativamente diferentes ($p < 0.05$) con respecto al testigo. Por consiguiente, el espesor juega un papel fundamental en la retención de color, lo cual está relacionado directamente con la GS, debido a que como se mencionó anteriormente, esta GS pudo ejercer un efecto protector en los pigmentos del betabel, siendo mejores los de 1 mm.

4.6.2 RESULTADOS DE COLOR EN BETABEL SECADO POR RW Y POR LA COMBINACIÓN DO-RW.

La tabla 9 muestra los resultados de los parámetros de color de las rodajas de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en RW a 60 y 85 °C. Los resultados indicaron que después del tratamiento osmótico se presentó un aumento en L^* a medida que se incrementaba la concentración de la solución osmótica, en ambas temperaturas del RW. Los tratamientos que no mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo con RW a 60 °C fueron T2, T4, T5, T8 y T9 con valores de L^* de que oscilaron de 27.75 a 26.75, mientras que con RW a 85 °C fueron T4, T5 y T9 que corresponden a valores de L^* de 26.26 a 26.76. Por otro lado, para las muestras sin tratamiento de DO, se encontró que no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo cuando fue secada a 60 °C con un valor de L^* de 26.73.

Tabla 9. Parámetros de color de rodajas de betabel de 1 mm de espesor deshidratadas osmóticamente y secadas por RW a 60 y 85 °C.

RW 60 °C					
TRAT.	L*	C*	°h	ΔE	
Testigo	26.78 ± 1.24^{a,b,c}	21.13 ± 1.82^{a,b,c,d}	20.05 ± 0.82^{a,b,c,d}	0.00 ± 0.00	
T1	25.50 ± 0.25 ^{ij,k}	11.14 ± 1.28 ^{m,n}	19.11 ± 8.74 ^{a,b,c,d}	10.27 ± 0.46 ^{f,g}	
T2	26.75 ± 0.22 ^{a,b}	11.58 ± 2.10 ^{l,m,n}	24.00 ± 6.57 ^{f,g,h,i}	9.77 ± 2.88 ^{e,f,g}	
T3	25.53 ± 0.34 ^{h,i,j,k}	11.05 ± 1.27 ^{m,n}	22.86 ± 3.08 ^{d,e,f,g}	10.28 ± 2.95 ^{f,g}	
T4	27.75 ± 0.58 ^{c,d,e}	14.72 ± 3.35 ^{h,i,j,k}	32.84 ± 9.66 ^j	7.80 ± 5.38 ^{c,d,e,f,g}	
T5	27.59 ± 0.32 ^{b,c,d}	15.28 ± 0.87 ^{h,i,j,k}	23.41 ± 1.23 ^{e,f,g,h,i}	6.10 ± 2.45 ^{a,b,c,d}	
T6	33.58 ± 0.23 ^g	22.19 ± 3.92 ^{b,c,d,e}	15.27 ± 2.21 ^{a,b,k}	8.25 ± 0.86 ^{d,e,f,g}	
T7	25.04 ± 0.58 ^{j,k,l,m}	10.55 ± 0.55 ⁿ	20.21 ± 3.63 ^{a,b,c,d}	10.77 ± 2.41 ^g	
T8	27.23 ± 0.16 ^{a,b,c}	16.74 ± 0.54 ^{g,h,i,j,k}	21.79 ± 2.17 ^{c,d,e,f}	4.65 ± 2.08 ^{a,b,c,d}	
T9	27.66 ± 0.46 ^{b,c,d}	18.36 ± 3.00 ^{a,b,g,h,i}	18.57 ± 3.61 ^{a,b,c,d}	3.37 ± 2.40 ^{a,b}	
SIN DO	26.73 ± 0.72 ^{a,b}	16.21 ± 1.88 ^{h,i,j,k}	16.82 ± 0.92 ^{a,b,c,d}	5.19 ± 2.00 ^{a,b,c,d}	
RW 85 °C					
TRAT.	L*	C*	°h	ΔE	
Testigo	26.78 ± 1.24^{a,b,c}	21.13 ± 1.82^{a,b,c,d}	20.05 ± 0.82^{a,b,c,d}	0.00 ± 0.00	
T1	25.69 ± 0.13 ^{h,i,j}	14.46 ± 4.14 ^{ij,k,l,m,n}	20.91 ± 0.99 ^{b,c,d,e}	6.86 ± 5.95 ^{a,b,c,d}	
T2	24.57 ± 0.29 ^{k,l,m,n}	14.26 ± 2.16 ^{ij,k,l,m,n}	21.01 ± 1.47 ^{b,c,d,e}	7.33 ± 2.36 ^{b,c,d,e}	
T3	25.69 ± 0.60 ^{h,i,j}	11.05 ± 1.05 ^{m,n}	27.96 ± 1.45 ^{ij}	10.41 ± 1.32 ^{f,g}	
T4	26.49 ± 0.48 ^{a,h}	13.59 ± 3.76 ^{k,l,m,n}	26.15 ± 6.54 ^{h,i}	7.81 ± 3.20 ^{c,d,e,f,g}	
T5	26.26 ± 0.26 ^{a,h,i}	15.39 ± 0.47 ^{h,i,j,k,l}	24.54 ± 2.72 ^{g,h,i}	6.08 ± 2.23 ^{a,b,c,d}	
T6	28.71 ± 0.62 ^{e,f}	18.04 ± 2.36 ^{a,g,h,i,j}	19.92 ± 3.77 ^{a,b,c,d,e}	4.19 ± 1.03 ^{a,b,c,d}	
T7	28.32 ± 0.31 ^{d,e}	18.61 ± 2.03 ^{a,b,g,h}	24.39 ± 3.67 ^{f,g,h,i}	4.54 ± 1.89 ^{a,b,c,d}	
T8	25.16 ± 0.38 ^{j,k,l,m}	14.77 ± 0.11 ^{h,i,k,k,l}	22.28 ± 1.56 ^{d,e,f,g}	6.64 ± 1.95 ^{a,b,c,d}	
T9	26.76 ± 0.19 ^{a,b}	16.62 ± 0.86 ^{h,i,j,k}	21.63 ± 6.70 ^{c,d,e,f}	5.10 ± 2.26 ^{a,b,c,d}	
SIN DO	29.38 ± 0.49 ^f	18.49 ± 0.78 ^{a,b,g,h}	18.84 ± 2.34 ^{a,b,c,d}	4.09 ± 0.36 ^{a,b,c,d}	

Los resultados son el promedio de tres repeticiones. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa (p<0.05).

El incremento de L* en algunos tratamientos después del secado en el RW indicó un ligero aclaramiento en el color a altas concentraciones, producidos por la

impregnación de azúcar que mantuvo la luminosidad, resultando en un producto final muy parecido al testigo, esto puede ser explicado por la gran cantidad de cristales que precipitaron a medida que el secado procedió, lo cual condujo a un rápido incremento en los valores de L^* para todas las muestras (Tan et al., 2001). Estos resultados fueron parecidos a los reportados por Mandala et al. (2005) cuando secaron por aire caliente muestras osmodeshidratadas con glucosa y sacarosa, encontrando que los valores de L^* fueron mayores después del secado. Por otro lado, Stajanovic y Silva, (2007), encontraron un incremento significativo en el valor de L^* durante el secado con aire caliente de arándanos osmodeshidratados con sacarosa a 55 °Brix a diferentes tiempos de DO, obteniendo productos más luminosos debido a un desvanecimiento del color oscuro típico de los arándanos. Carabasa-Giribet et al. (2000) reportaron que la energía de activación para formación de intermediarios de oscurecimiento aumenta con el incremento de la concentración y temperatura, cuanto mayor sea la energía de activación mayor será la degradación de pigmentos marrones a incoloro, este fenómeno pudiera haber ocurrido y generar altos valores de L^* en tiempos más largos de DO, los cuales indican mayor absorción de azúcar.

En cuanto a la C^* se presentó una disminución de este valor después de ser secadas con RW en ambas temperaturas, éste parámetro disminuyó su valor, sugiriéndose que se presentó un efecto de concentración de pigmentos debido a la eliminación de agua restante. Los mejores resultados fueron obtenidos en los tratamientos T6 y T9 cuando fueron secados en el RW a 60 °C con valores de C^* de 22.19 y 18.36, respectivamente, mientras que con RW a 85 °C los tratamientos T6 y T7 con valores de 18.04 y 18.61 respectivamente, no mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) con el testigo. Mientras que en lo referente al °h, se presentó un incremento de este parámetro en todas las concentraciones a bajas temperaturas, siendo los tratamientos T1, T3, T6, T7, T8 secados en el RW a 60 °C con valores de °h de 22.86 a 18.57 y los tratamientos T1, T2, T6, T8 y T9 secados a 85 °C en el RW con valores que fluctuaron de 22.28 a 19.92 los que no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) con el testigo. Para el caso de las

muestras sin tratamiento de DO, no se presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) en RW a 60 y 85 °C, donde se encontraron valores del °h de 16.82 y 18.84 respectivamente, mostrándose que el incremento de la temperatura, aumentó este valor. Con respecto a esto Stajanovic y Silva, (2007) reportaron valores bajos de cromaticidad de las muestras de arándanos concentradas osmóticamente y secadas con aire caliente los cuales fueron significativamente más bajos que el testigo ($p < 0.05$), atribuyendo esto a la influencia del alto contenido de azúcar y el secado sobre los cambios de color de los arándanos. Sin embargo, a pesar de las variaciones en L^* , C^* y °h, debidas probablemente a la estructura no homogénea del betabel, la ΔE mostró que los mejores resultados fueron los obtenidos con tratamiento de DO a altas concentraciones de sacarosa y temperaturas, cuando fueron secados en el RW a 60 y 85 °C, siendo los tratamientos T5, T8 y T9 secados a 60 °C en el RW y los tratamientos T5, T6, T7, T8 y T9 secados a 85 °C en el RW, los que no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo, esto fue atribuido a que la presencia de azúcar sobre la superficie de las muestras tratadas previno la transferencia de oxígeno en la fruta reduciendo así el pardeamiento enzimático (Krokida et al., 2001). De igual modo Mandala et al. (2005) indicaron que esto ocurrió debido a la absorción de sólidos, que se tradujo en menor O_2 transferido a la superficie. Todo esto resultó en una menor decoloración por pardeamiento enzimático de las muestras osmotizadas, que al presentar valores bajos de contenido de humedad después de la DO contribuyó a la inhibición de la acción de enzimas oxidantes. De la misma forma Stajanovic y Silva, (2007) reportaron las menores diferencias ΔE en arándanos, cuando fueron osmóticamente deshidratadas y secadas, sugiriendo que la combinación de alta temperatura, alta concentración de azúcar y la disponibilidad de oxígeno tuvieron influencia en el cambio de color.

Por lo que respecta al betabel sin tratamiento de DO el cual se muestra en la tabla 9, se observó que la ΔE del betabel secado a 60 y 85 °C en el RW con valores de 5.19 y 4.09 respectivamente, no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo. Fue evidente que el aumento de la temperatura disminuyó la ΔE ,

esto se atribuyó al tiempo de secado en el RW, el cual fue relativamente más corto en 85 °C. Por lo tanto la capacidad del secador RW para obtener rodajas de betabel con buena retención del color, probablemente fue debido al modo de operación del RW en el cual se involucran los tres modos de transferencia de calor que evaporan el agua rápidamente y de esta manera se evita la degradación de los pigmentos del betabel por sobrecalentamiento. Resultados similares fueron reportados por Caparino et al. (2012) quienes deshidrataron puré de mango con diferentes métodos de secado (RW, liofilizado, secado por aspersion y secado de tambor), concluyendo que el secado con RW produjo polvo de mango con una calidad superior en comparación con el secado de tambor y aspersion, siendo comparable con la liofilización.

4.6.3 RESULTADOS DE PERFIL DE TEXTURA POR PUNCIÓN (PTP) EN BETABEL DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE.

El secado del tejido de las plantas produce muchos cambios en la estructura y distribución de los constituyentes. La eliminación de agua aumenta la viscosidad de la parte líquida de los tejidos y la simultánea transferencia de calor y masa crea gradientes de humedad y temperatura (Lewicki y Jakubczyk, 2004). Los resultados de PTP de las rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente a diferentes concentraciones de sacarosa, temperaturas y espesores se muestran en la figura 14, donde se expresó la fuerza máxima de penetración de las rodajas de betabel en Newtons (N). Se observó que después del proceso de DO todos los tratamientos presentaron una disminución significativa en la textura con respecto al testigo ($p < 0.05$) en ambos espesores, lo cual se reflejó en la disminución de la fuerza de punción por el reblandecimiento en las rodajas tratadas con DO. La fuerza de punción del betabel de 1 mm de espesor sin DO fue de 1.1 ± 0.10 N, después de la DO se obtuvieron valores que oscilaron de 0.76 a 0.62 N, donde los tratamientos más parecidos significativamente ($p < 0.05$) con respecto al testigo fueron obtenidos en todas las concentraciones a bajas temperaturas (30 y 45 °C). Por otra parte, la fuerza de punción del betabel de 5 mm sin tratamiento de DO fue de 3.04 ± 0.38 N,

donde los mejores tratamientos fueron obtenidos a las concentraciones de 35 y 50% a bajas temperaturas (30 °C), los cuales fueron más parecidos al testigo ($p < 0.05$), esta disminución de la fuerza fueron atribuidos a la PA de las rodajas de betabel, ya que como se mencionó anteriormente esta PA fue menor a bajas concentraciones y temperaturas. Lo anterior está relacionado con los flujos de transferencia de masa y presión osmótica de la solución de sacarosa, ya que a medida que transcurre el tiempo de la DO, las células muestran alteraciones en el citoplasma de diferentes grados que van desde el aumento del hinchamiento hasta la retracción completa de la pared celular; además, se presenta una desconexión entre las células haciendo que la pared celular pierda su forma y como consecuencia la presión de turgor hasta el completo rompimiento del tejido. Esta desconexión celular puede ser debida a la solubilización de la pectina quelante-soluble, la cual según afirmaciones en la literatura es uno de los principales contribuyentes para la adhesión celular y firmeza, ligando a la lamela media (Buren et al., 1991). Además de la pérdida de turgor, las alteraciones en la estructura celular (redistribución de fibrillas, plegado de paredes celulares, potencial degradación y solubilización de macromoléculas) podrían ser las principales responsables en la disminución de la tensión de ruptura.

Este reblandecimiento es confirmado en la literatura por diferentes autores como Chiral et al. (2001) y Talens et al. (2002). Asimismo, Prinzivall et al. (2006), mencionaron que en el vegetal fresco, la célula típica con paredes delgadas muestra una morfología con una membrana plasmática y citoplasma estrechamente adpresas contra la pared celular, manteniendo así el turgor en el vegetal, sin embargo, cuando éste se somete a DO, la pared celular se va distorsionando en diversas áreas y se presenta un hinchamiento citoplasmático debido a la pérdida de presión de turgor, la cual está vinculada con la PA. De igual modo Mandala et al. (2005), reportaron que el esfuerzo a la fractura de las muestras de manzanas osmodeshidratadas fueron considerablemente más bajos que las no tratadas. Otras investigaciones con resultados similares como las de Vicente et al. (2012) quienes deshidrataron osmóticamente manzanas frescas (*Malus pumila*, *Granny smith*) encontraron que el turgor en las células sometidas a DO no puede ser mantenido

espesor, mientras que para las de 5 mm la pérdida de firmeza fue de un 70.03%, resultando mejores las de 1 mm de espesor.

4.6.4 RESULTADOS DE PERFIL DE TEXTURA POR PUNCIÓN (PTP) EN BETABEL SECADO POR RW Y LA COMBINACIÓN DO-RW.

En la figura 15 se muestran los resultados de PTP de las rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica a diferentes concentraciones de sacarosa y temperatura con posterior aplicación de RW a 60 y 85 °C. Las rodajas con DO secadas a 60 °C en el RW no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo independientemente de la concentración de sacarosa y la temperatura empleada, obteniéndose valores de fuerza de punción de 1.14 a 0.98 N. Mientras que con la temperatura de 85 °C en el RW se obtuvieron valores de la fuerza de punción de 1.99 a 1.08 N, observándose un incremento en la fuerza de punción provocada probablemente por el aumento de la temperatura del RW, así como a la absorción de sólidos por parte de las rodajas durante el tratamiento de DO que al ser secados en el RW se tornaron en una estructura más compacta, lo que resultó en un incremento de la fuerza de penetración, los mejores tratamientos fueron obtenidos en las muestras tratadas osmóticamente en todas las concentraciones (35, 50 y 65%) a 60 °C, las cuales no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) con el testigo, lo cual fue atribuido al encogimiento del tejido, que pudo haber causado la reducción del esfuerzo interno y destruir la paredes celulares, creando cavidades y resultando en la pérdida general de la estructura del tejido, reduciendo significativamente la resistencia a la ruptura (Lewicki & Jakubczyk, 2004). Las muestras tratadas a 35 y 50% a bajas temperaturas presentaron un incremento de la fuerza de punción comparadas con 65% de sacarosa, lo cual fue atribuido al tiempo de secado en el RW, que como se mencionó anteriormente este tiempo fue mayor que en altas concentraciones de sacarosa en la DO, provocando un endurecimiento más pronunciado, además que el incremento de la firmeza podría ser atribuido a la cantidad de sólidos de estas muestras y una velocidad relativa alta de pérdida de humedad durante el inicio del secado que

contribuyó a la cristalización y consecuentemente al endurecimiento. Sin embargo, otros factores como el grado de destrucción del tejido, tanto en la ósmosis como en el secado podrían influir en los valores de firmeza (Mandala et al., 2005).

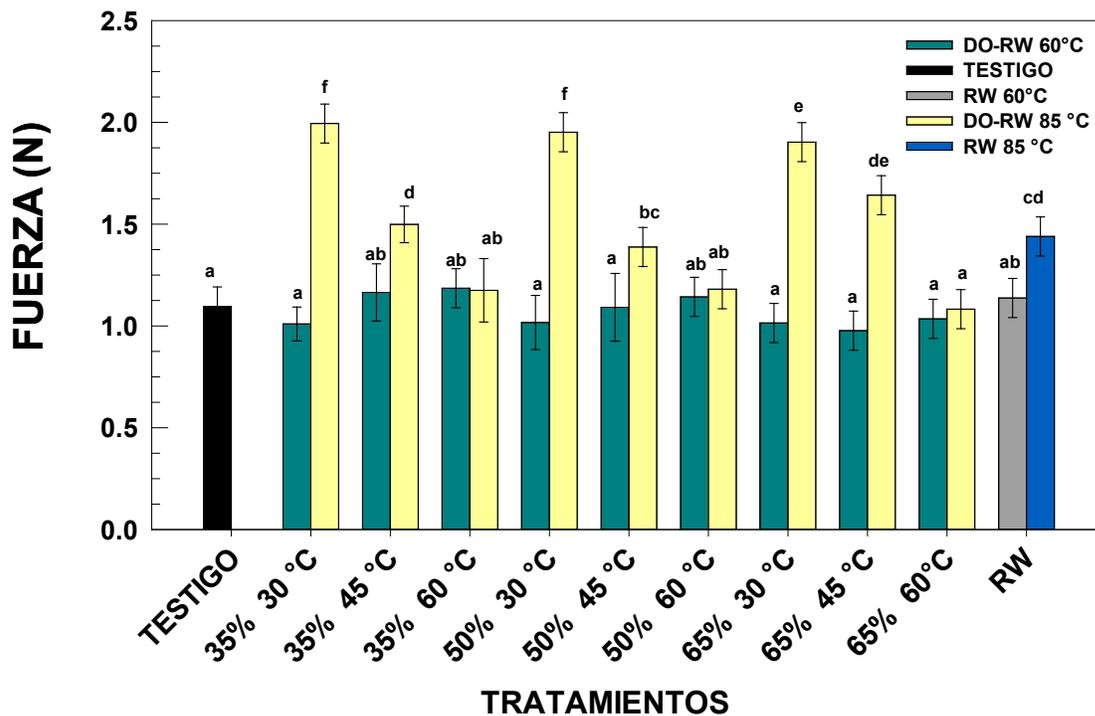


Figura 15. Resultados de PTP de rodajas de betabel de 1 mm de espesor osmóticamente deshidratadas a diferentes concentraciones y temperaturas. Letras diferentes indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

Para el caso de las muestras secadas en el RW sin tratamiento de DO, se observó que a 60 °C no se presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo, sin embargo, a 85 °C este valor fue significativamente diferente ($p < 0.05$), encontrándose valores de 1.14 y 1.44 N respectivamente, presentándose un aumento de este parámetro por el incremento de la temperatura. Investigaciones con una tendencia similar fueron realizadas por Wang et al. (2010) quienes atribuyeron el incremento de la fuerza de fractura de papas deshidratadas osmóticamente y secadas por microondas-liofilización a la alta absorción de solutos y a la rápida velocidad de secado, lo cual resulta en una menor porosidad del producto y mayor rigidez en la estructura. Por otro lado, Bchir et al. (2012) reportaron

un incremento en la dureza durante el secado con aire caliente de 38, 55 y 60 N que fue más acentuado a medida que se incrementó la temperatura del aire, explicando que este comportamiento era provocado por el colapso estructural de las semillas de granada, el cual era inducido por el incremento de la pérdida de agua durante el tratamiento osmótico y el proceso de secado. Rodríguez et al. (2015) también reportaron un incremento de la firmeza después del secado en las ciruelas tratadas osmóticamente.

4.7 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL BETABEL SOMETIDO A DO, RW Y DO-RW.

El betabel ha atraído considerable atención en la investigación durante los últimos años debido a su contenido de pigmentos naturales los cuales pueden ser usados por la industria alimentaria (Nemzer et al., 2011; Loginova et al., 2011), así como para la industria textil, entre otras (Sivakumar et al. 2009; Pavoković y Krsnik-Rasol 2011). Además, varios de los compuestos que se encuentran en el betabel, tales como las betalaínas, de las cuales se ha encontrado que tienen efectos benéficos en la salud, como la actividad antioxidante (Lee et al., 2009; Sugihara et al., 2009), lo hacen muy interesante desde un punto de vista dietético y de salud. Los compuestos antioxidantes son considerados como un indicador de la calidad de un alimento procesado debido a la baja estabilidad de éstos durante un proceso térmico. La capacidad antioxidante es un mecanismo que reduce la oxidación lipídica en tejidos de plantas y animales por la captura de radicales libres. Por lo tanto, los alimentos que tienen capacidad antioxidante reducen el riesgo de desarrollar varios padecimientos, tales como arteriosclerosis, cáncer y enfermedades cardiovasculares, además de prevenir el envejecimiento prematuro (Angelo y Jorge, 2007).

4.7.1 RESULTADOS DE CONTENIDO DE POLIFENOLES TOTALES (CPT), CONTENIDO DE FLAVONOIDES TOTALES (CFT) Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (CA) EN BETABEL DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE.

Los resultados del CPT de las muestras de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores se muestran en la figura 16. Se observó que todos los tratamientos de DO indujeron a cambios en el CPT de las rodajas de betabel, habiendo diferencias significativas con respecto al testigo ($p < 0.05$) en ambos espesores, atribuyéndose esto a la lixiviación de los compuestos polifenólicos hacia la solución osmótica, provocada por los gradientes de transferencia de masa debidos al incremento de la temperatura de la solución osmodeshidratante. El CPT del testigo fue $312.62 \pm 0.41 \mu\text{g EAG/mL}$ del extracto, después de la DO los tratamientos más parecidos al testigo ($p < 0.05$) se obtuvieron a bajas temperaturas de la solución osmótica en todas las concentraciones de sacarosa empleadas para ambos espesores, dado que con el incremento en la temperatura de la solución osmótica se produjo un aumento en la velocidad de difusión de flujos de masa (Lewicki et al., 1998), encontrándose valores de CPT de 162.20 a 130.31 $\mu\text{g EAG/mL}$ del extracto para las rodajas de 1 mm de espesor, mientras que para las de 5 mm los valores de CPT oscilaron de 280.21 a 143.57 $\mu\text{g EAG/mL}$ del extracto para los mejores tratamientos. Resultados parecidos fueron reportados por Devic et al. (2010) quienes encontraron una marcada migración de ácidos hidroxicinámico y catequinas monoméricas hacia la solución osmodeshidratante, explicando así la disminución de los compuestos fenólicos en las muestra sometidas a DO, mientras que Kucner et al., (2013), realizaron la deshidratación osmótica de arándanos y manzanas encontrando que el contenido de polifenoles de las muestras deshidratadas disminuían conforme se aumentaba la temperatura.

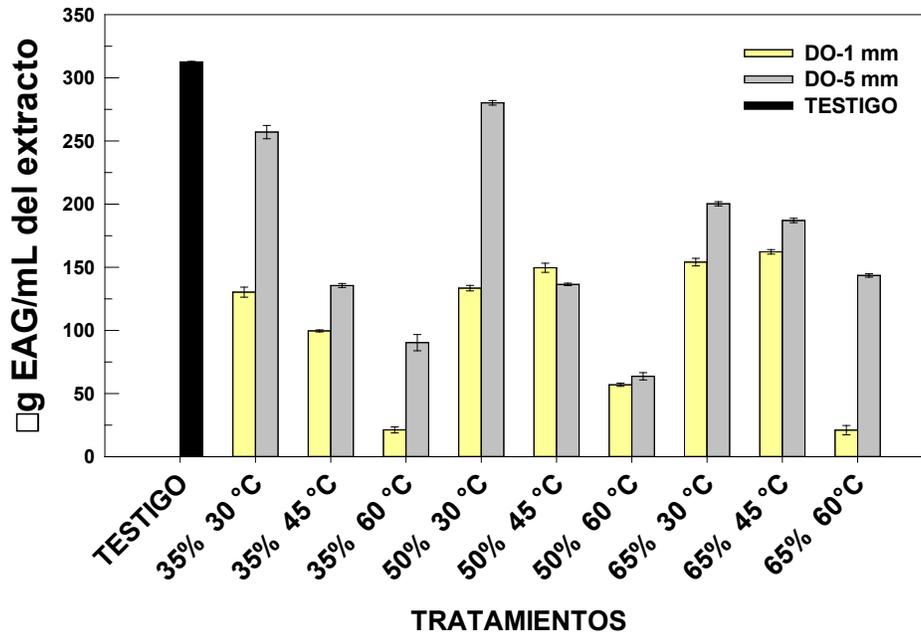


Figura 16. Resultados de CPT de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.

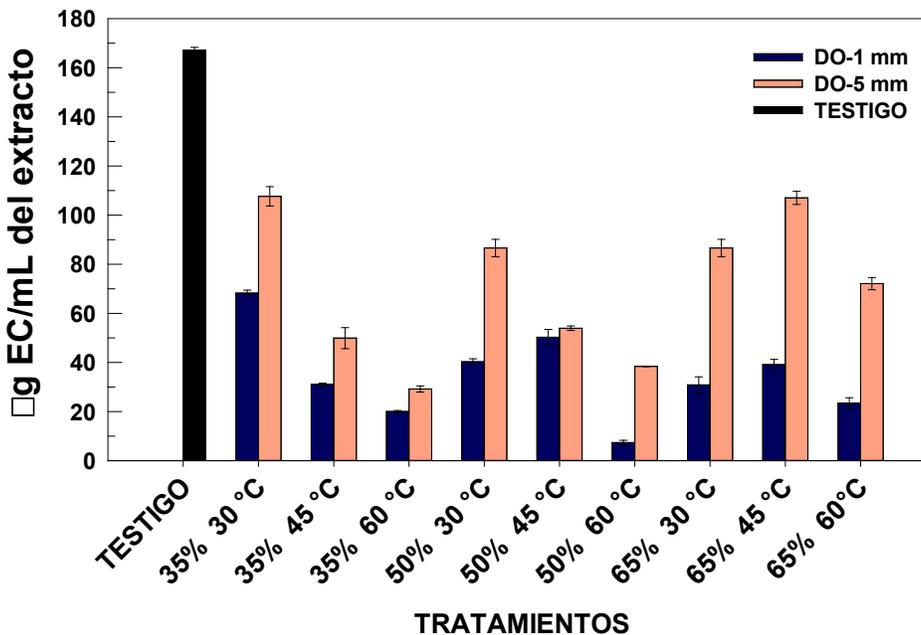


Figura 17. Resultados de CFT de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.

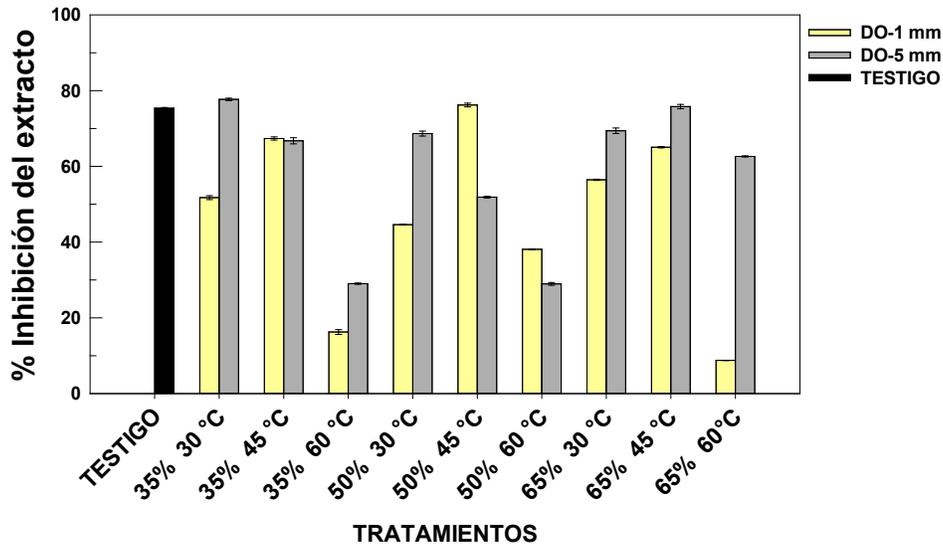


Figura 18. Resultados de CA del extracto de rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores.

Por otro lado, en la figura 17 se aprecian los resultados correspondientes al CFT de las muestras de betabel deshidratadas osmóticamente con sacarosa a diferentes concentraciones, temperaturas y espesores, donde se presentó un comportamiento muy parecido al ocurrido en los compuestos polifenólicos, donde las principales pérdidas de flavonoides fueron atribuidas a la difusión de estos compuestos bioactivos hacia la solución osmodeshidratante, presentándose diferencias significativas con respecto al testigo ($p < 0.05$) en ambos espesores. Sin embargo, los mejores tratamientos fueron obtenidos a 30 y 45 °C en todas las concentraciones de sacarosa en ambos espesores, debido a que el incremento de temperatura favoreció el colapso de la célula, causando una reducción en la permeabilidad y selectividad de las membranas, favoreciendo la lixiviación de estos compuestos hacia la solución osmótica junto con la difusión del agua.

Otro mecanismo que puede ser considerado es la hidrólisis de las moléculas polifenólicas, lo cual reduce el grado de polimerización de algunos compuestos fenólicos, favoreciendo la lixiviación de compuestos de bajo peso molecular durante la DO, de igual forma el incremento del tiempo de DO puede también promover las

reacciones de prooxidación de los compuestos fenólicos, principalmente la oxidación enzimática (Devic et al., 2010). El CFT del testigo fue $167.24 \pm 1.07 \mu\text{g EC/mL}$ del extracto, después de la DO se obtuvieron valores de 68.26 a $30.86 \mu\text{g EC/mL}$ del extracto para las rodajas de 1 mm de espesor en los mejores tratamientos. Por otra parte en las rodajas de 5 mm el CFT fue de 107.67 a $49.90 \mu\text{g EC/mL}$ del extracto en los mejores tratamientos. Investigaciones realizadas por Almeida et al. (2015) reportaron que en la DO de plátano con solución de sacarosa, la mayor retención de compuestos fenólicos se obtuvieron a temperaturas bajas, independientemente de la concentración de la solución osmódeshidratante, Osorio et al. (2007) observaron una reducción de antocianinas del 86% en bayas después de la DO con soluciones de sacarosa a 30°C , por otro lado Chottamom et al. (2012) reportaron un 52-61% de reducción de antocianinas y de un 51-68% en los compuestos fenólicos después de 6 h de inmersión en solución de sacarosa al 60% a 35°C y Kuncer et al. (2013) estudiaron la influencia de la temperatura ($30-70^\circ\text{C}$), la duración de la DO (5-240 min) y algunos pretratamientos sobre el contenido fenólico en arándanos, concluyendo que 13.8, 17.5 y 54.7% del contenido fenólico presente en los arándanos migran hacia el jarabe. Por su parte, Araya-Farías et al. (2014) observaron una disminución del 12% en el contenido fenólico de espino amarillo deshidratado osmóticamente después de 6 h a 40°C .

El contenido de polifenoles y flavonoides contribuye a la actividad antioxidante de los extractos, teniendo diferentes patrones de comportamientos en respuesta de la temperatura, presencia de oxígeno y otros factores (Stojanovic y Silva, 2007). En la figura 18 se muestran los resultados de CA de las rodajas de betabel deshidratadas osmóticamente a diferentes concentraciones de sacarosa, temperaturas y espesores. Los resultados mostraron que la CA de los extractos de las rodajas de betabel con DO fueron significativamente diferentes con respecto al testigo ($p < 0.05$) en ambos espesores, siendo los mejores resultados los obtenidos en todas las concentraciones de sacarosa empleadas a bajas temperaturas (30 y 45°C), esta CA fue atribuida a la retención de compuestos polifenoles y flavonoides durante la DO, donde fue evidente que la temperatura de la solución fue un factor principal

para esta retención de estos compuestos. El % de inhibición del testigo fue de 75.36 \pm 0.20, los mejores tratamientos de las rodajas de 1 mm obtuvieron un % de inhibición de 76.21 a 51.74, mientras que en las rodajas de 5 mm el porcentaje de inhibición de los mejores tratamientos fue 77.70 a 62.64, presentando diferencias significativas con el testigo ($p < 0.05$). Se logró observar que a pesar de la disminución del CPT y CFT el porcentaje de inhibición fue ligeramente mayor que el testigo en los tratamientos a bajas temperaturas, tanto en los de 1 mm como en los de 5 mm, y a medida que se incrementaba la temperatura la CA disminuía, esta retención de la CA fue probablemente el resultado de la penetración de la solución osmótica dentro del tejido que previno la interacción de la actividad de la PPO presente en el betabel, debido a que con la solución osmótica se produjo un encogimiento de la parénquima, la cual fue inundada por solutos osmóticos y con ello se redujo la disponibilidad de O₂ en la microestructura que rodea a la enzima, por lo que la oxidación enzimática probablemente se redujo (Quiles et al., 2005). Resultados similares fueron encontrados por Bchir et al. (2012) cuando reportaron la disminución de los compuestos polifenólicos y antocianinas en semillas de granada después de la DO que implicó una disminución de la actividad antioxidante.

De igual manera se observó que las rodajas de 5 mm de espesor mostraron los mejores resultados de CTP, CFT y CA, esto se atribuyó a que durante la DO posiblemente estas rodajas al tener un espesor mayor, no se hayan lixiviado los pigmentos del centro de la rodaja, dejando células intactas como consecuencia de la obstrucción del poro por la GS, caso contrario con las rodajas de 1 mm donde hubo mayor superficie de contacto con la solución osmótica, ya que el proceso de DO tiene gran impacto sobre las propiedades físicas (mecánicas y ópticas) y químicas (perfiles volátiles) del producto final, en parte debidas a la cantidad de células alteradas y no alteradas del producto durante la DO (Chiralt y Talens, 2005), no obstante, se observó que a 50% de sacarosa y 45 °C el mayor CPT y CA se presentó en las rodajas de 1 mm, esto fue atribuido a que probablemente con la disminución del espesor las rodajas de 1 mm llegaron al equilibrio en menor tiempo,

disminuyendo así la lixiviación de los compuestos polifenólicos, caso contrario a las rodajas de 5 mm. Sin embargo, para efectos del secado en RW se tomaron en cuenta las rodajas de 1 mm de espesor, debido que en estas se presentaron la mejor PA y GS, además de que el RW requiere de espesores menores de 5 mm para lograr una eficiencia en el secado. En general, los resultados indicaron que la retención CPT, CFT y CA dependió en gran medida de la temperatura de la solución osmótica empleada, que como ya se observó fue mejor a bajas temperaturas (30 y 45 °C).

4.7.2 RESULTADOS DEL CONTENIDO DE POLIFENOLES TOTALES (CPT), CONTENIDO DE FLAVONOIDES TOTALES (CFT) Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (CA) EN BETABEL SECADO CON RW Y LA COMBINACIÓN DO-RW.

Las figuras 19 y 20 muestran los resultados de CPT y CFT de las rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con DO a diferentes concentraciones de sacarosa y temperatura, secadas en el RW a 60 y 85 °C. Se observó que después del tratamiento de DO y el secado en el RW en ambas temperaturas (60 y 85°C) se presentó un incremento en el CPT y CFT en todos los tratamientos de DO, habiendo diferencias significativas con respecto al testigo ($p < 0.05$). Los mejores resultados fueron obtenidos con 35% de sacarosa en todas las temperaturas, mientras que para 50 y 65% de sacarosa a 30 y 45 °C. Sin embargo el mejor tratamiento fue con 50% de sacarosa y 45 °C secadas a 60 °C en el RW con un CPT de 537.92 µg EAG/mL del extracto, mientras que en el RW a 85 °C el mejor tratamientos fue 35% de sacarosa y 45 °C con 563.36 µg EAG/mL del extracto, por lo que respecta al betabel secado en el RW a 60 y 85 °C sin tratamiento de DO, el CPT fue de 604.58 y 478.66 µg EAG/mL del extracto, respectivamente, observándose una disminución de estos compuestos con el incremento de la temperatura. Sin embargo estos valores fueron mayores que el testigo, presentándose diferencias significativas ($p < 0.05$). Por otra parte, el CFT mostró una tendencia similar al CFT, encontrándose el mejor tratamiento con DO y secado en el RW a 60 °C a 35% 45 °C con un valor de 292.57 µg EC/mL del extracto, mientras que con RW a 85 el mejor tratamiento

fue a 35% 45 °C con 281.62 µg EC/mL del extracto. Para los tratamiento secados en el RW a 60 y 85 °C sin tratamiento de DO el CFT fue de 314.48 y 244.29 µg EC/mL del extracto respectivamente. Se observó que el CTP y CFT de estas muestras presentaron valores mayores que el testigo, presentándose diferencias significativas ($p < 0.05$) en ambas temperaturas del RW, siendo mejor retenidos a 60 °C. El aumento del CPT y CFT fue atribuido a que con el tratamiento térmico en el RW pudo haber liberado ácidos fenólicos enlazados por el rompimiento de los constituyentes celulares. Aunque la destrucción de las paredes celulares también pueden destruir los antioxidantes en frutas y vegetales (Dewanto et al., 2002).

Por otra parte, en la figura 21 se muestran los resultados de CA de la rodajas de betabel de 1 mm de espesor con y sin deshidratación osmótica con sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en el RW a 60 y 85 °C. La CA, mostró un incremento después del secado en el RW, encontrando que el CPT y CFT de las muestras sin y con DO contribuyeron a la retención de la capacidad antioxidante, presentándose diferencias significativas con respecto al testigo ($p < 0.05$) en ambas temperaturas del RW. Los mejores tratamientos fueron obtenidos con 35% de sacarosa en todas la temperaturas de DO, mientras que para 50 y 65% fueron a las temperaturas de 30 y 45 °C, con % de inhibición mayores al testigo de 88.81 a 61.66 para el RW a 60 °C, mientras que con el RW a 85 °C el % de inhibición de los extractos fue de 88.81 a 74.32. En los tratamientos secados en el RW a 60 y 85 °C sin DO se obtuvieron valores de % de inhibición de 75.22 y 65.25 respectivamente, observándose que no hubo diferencia significativa a 60 °C con respecto al testigo ($p < 0.05$), además fue notorio que estos valores fueron menores que las muestras tratadas con DO, lo cual sugirió que el pretratamiento favoreció el aumento del CPT y CFT y por lo tanto la CA. Este comportamiento puede ser resultado de que en procesos con alta temperatura pueden conducir a la formación de nuevos compuestos con alta actividad antioxidante, este es esencialmente el caso de la reacción de Maillard, la cual deriva de productos formados por antioxidantes fuertes como el hidroximetilfurfural (Piga et al., 2003; Ahmad Qasem et al., 2013). Por otro lado, el calentamiento debilita las células facilitando la

extracción de compuestos antioxidantes (Vásquez Parra et al. 2013), además que en procesos desarrollados a 65-70 °C se inactivan ciertas enzimas que degradan los compuestos fenólicos en frutas (Piga et al., 2003), lo cual probablemente ocurrió en las muestras con y sin DO.

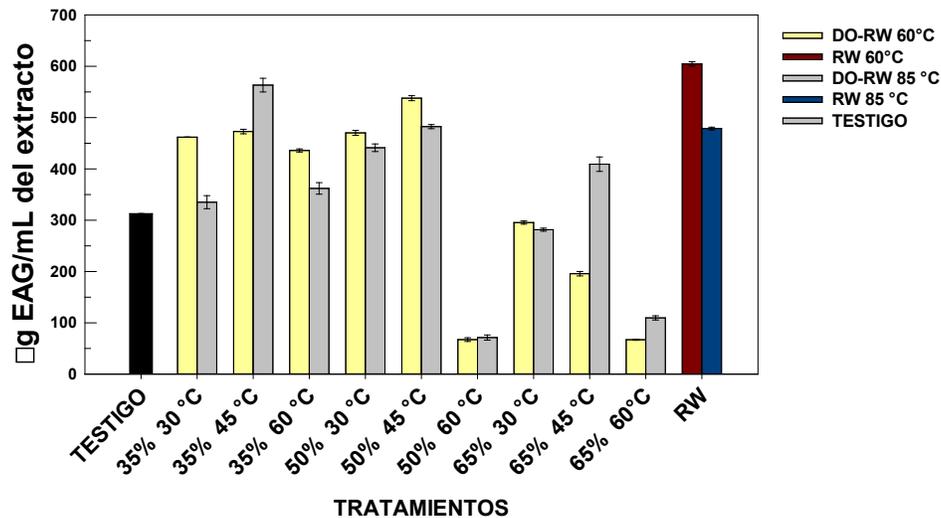


Figura 19. Resultados de CPT de rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica con sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en el RW a 60 y 85 °C.

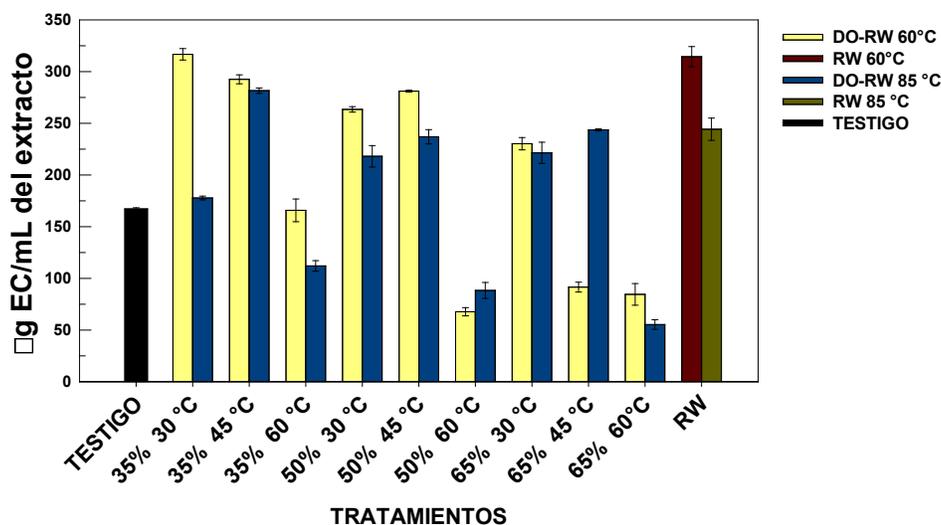


Figura 20. Resultados de CFT de rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica con sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en el RW a 60 y 85 °C.

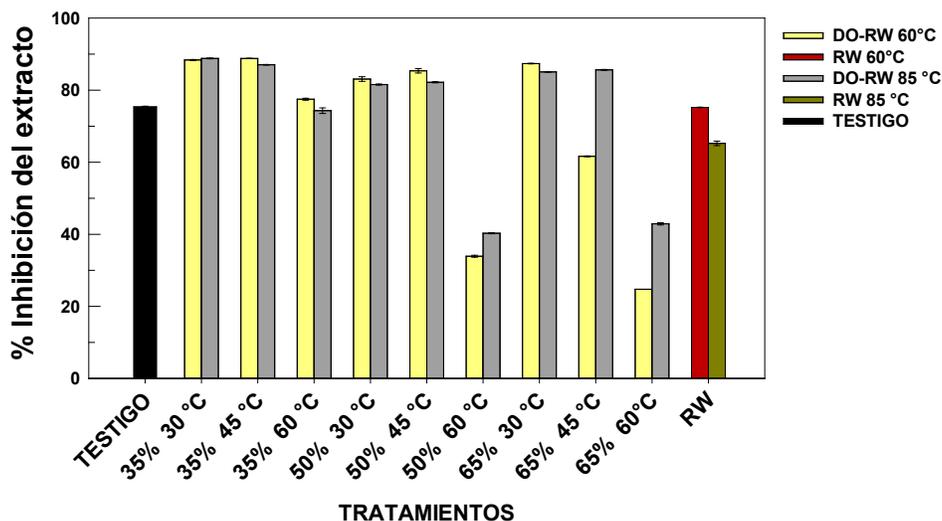


Figura 21. Resultados de CA de los extractos de rodajas de betabel de 1 mm de espesor sin y con deshidratación osmótica con sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas, secadas en el RW a 60 y 85 °C.

Resultados con una tendencia similar fueron encontrados por Rodrigues et al. (2015), quienes reportaron que después del tratamiento de DO con glucosa y sorbitol en ciruelas y secado con aire caliente a 60, 70 y 80 °C, encontraron que las muestras secadas a 70 u 80 °C mostraron un alto contenido de fenoles y flavonoides que los obtenidos en las muestras frescas, atribuyendo este incremento del contenido de antioxidantes a la generación de compuestos con propiedades antioxidantes y como consecuencia altos valores de capacidad antioxidante.

En cuanto a las muestras sin DO, la CA de las muestras fue influenciada de igual forma por el CPT y CFT, encontrándose un incremento con respecto al testigo, presentándose la mejor retención a 60 °C. Investigaciones realizadas por Nindo et al. (2003b) demostraron que la retención de ácido ascórbico y la actividad antioxidante del puré de espárragos fue mejor retenida en el secado por RW, cuando lo comparó con la liofilización, secado en microondas-charola, secado en charolas y secado en tambor, atribuyendo esto a que el proceso en el RW el producto se calienta más rápido, provocando un aumento de la liberación de compuestos fenólicos unidos a la matriz celular, donde la pérdida de agua fue mayor

al inicio del secado y la presión parcial del oxígeno cerca del producto llegó a ser muy baja debido a la alta presión de vapor creada por la evaporación de humedad (Abonyi et al., 2002). Por su parte Abul-Fadl y Ghanem, (2011) reportaron una mejor retención de contenido total de flavonoides, ácido L-ascórbico y licopeno cuando fue secado en el RW, lo cual se reflejó en la alta retención de actividad antioxidante del polvo de tomate obtenido, atribuyendo esto al tiempo de secado que fue relativamente corto comparado con el secado convectivo, concluyendo que el sistema RW tuvo efectos positivos en la protección de los compuestos bioquímicos de materiales frescos y reteniéndolos mejor al final del proceso de secado. Por otra parte, Kaspar et al. (2012) mencionaron que el secado por RW pareció ser el método de procesamiento más rentable para maximizar la retención de compuestos bioactivos como fenoles, carotenoides, antocianinas y actividad antioxidante en rodajas de papas.

CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES.

- El incremento de la concentración y la temperatura son factores que promovieron la PA y GS, siendo las concentraciones de 50 y 65% de sacarosa a 45 y 60 °C las que mayor PA y GS mostraron, en ambos espesores.
- La disminución del espesor de las rodajas aumentó la PA y GS, siendo más adecuados los tratamientos de rodajas con espesor de 1 mm debido a que alcanzaron el equilibrio en menor tiempo.
- Los valores de De_a oscilaron en un intervalo de 9.9385×10^{-08} a 3.0147×10^{-09} m²/s, encontrándose que a mayor concentración de solución osmodeshidratante y temperatura, los valores de difusividad se incrementaron, no obstante, disminuyeron con el aumento del espesor.
- Los valores de De_s se obtuvieron en un intervalo de 4.6488×10^{-08} a 5.7513×10^{-11} m²/s, estos fueron menores que los de la difusividad de agua. Los resultados de De_s disminuyeron con el aumento del espesor de la rodajas de betabel. El incremento de la concentración osmodeshidratante disminuyó los valores de De_s , mientras que con el aumento de la temperatura los valores de difusividad aumentaron.
- Los valores altos de De_a y bajos de De_s indicaron que se limitó la absorción de sacarosa, mientras que se favoreció la pérdida de agua.
- El tratamiento de DO redujo parcialmente el contenido de agua de las rodajas betabel, alcanzando una disminución del contenido de humedad mayor al

- 50% en la concentración de sacarosa más baja y de un 73 a 85% en las concentraciones de 50 y 65% de sacarosa a las temperaturas de 45 y 60 °C.
- Las rodajas de betabel con pretratamiento de DO y secadas a 60 °C en el RW lograron una disminución del tiempo de secado, requiriéndose de tiempos de secado de aproximadamente de 70, 60 y 50 min para 35, 50 y 65% de sacarosa.
 - Las rodajas pretratadas con DO y secadas en el RW a 85 °C, presentaron una disminución de tiempo significativa cuando fueron pretratadas con 65% de sacarosa.
 - La diferencia de color (ΔE) en la DO, indicó que los tratamientos de 1 mm de espesor no mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo, mientras que las de 5 mm fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$).
 - Para el efecto combinado DO-RW, la ΔE mostró que los mejores resultados fueron los obtenidos con tratamiento de DO a altas concentraciones de sacarosa y temperatura, cuando fueron secados en el RW a 60 y 85 °C.
 - La DO provocó una disminución significativa en la textura con respecto al testigo ($p < 0.05$), observándose una disminución de la fuerza de punción de un 46.77% en la rodajas de 1 mm y de 70.03% en las de 5 mm.
 - Para el efecto combinado DO-RW las rodajas de 1 mm mostraron un incremento en la fuerza de punción, las rodajas secadas a 60 °C en el RW no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo independientemente de la concentración de sacarosa y la temperatura empleada. Por otro lado, las muestras secadas en el RW a 85 °C y tratadas osmóticamente en todas las concentraciones a 60 °C no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$).

- La retención CPT, CFT y CA durante la DO dependió de la temperatura de la solución osmótica empleada, presentándose una mejor retención en todas las concentraciones a bajas temperaturas (30 y 45 °C) en ambos espesores.
- Para el efecto DO-RW a 60 y 85 °C de rodajas de 1 mm, se presentó un incremento en el CPT, CFT y CA en todos los tratamientos. Los mejores resultados fueron obtenidos con 35% de sacarosa en todas las temperaturas, mientras que para 50 y 65% de sacarosa se obtuvieron a 30 y 45 °C.
- Con respecto a las muestras secadas en el RW sin tratamiento de DO, se observó que el CTP, CFT y CA presentaron valores mayores que el testigo en ambas temperaturas del RW, siendo mejor retenidos a 60 °C.
- Finalmente, el tratamiento de DO, no disminuyó considerablemente el tiempo de secado en algunos tratamientos, pero logró retener las propiedades físicas y químicas del betabel, siendo los mejores tratamientos del efecto combinado DO-RW las muestras tratadas en todas las concentraciones de sacarosa a las temperaturas de 30 y 45 °C, secadas en el RW a 60 °C.

REFERENCIAS

VI. REFERENCIAS.

- Abbasid, A., Niakousari, M., Ardekani, S. A. Y. (2015). The advantages of the Refractance Window method of dehydrating fresh tomato slices and the relevant characteristics thereof. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 4(11S), 6-13.
- Abonyi, B. I., Feng, H., Tang, J., Edwards, C. G., Chew, B. P., Mattinson, D. S., & Fellman, J. K. (2002). Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. *Journal of Food Science*, 67(3), 1051-1056.
- Abraão, A. S., Lemos, A. M., Vilela, A., Sousa, J. M., & Nunes, F. M. (2013). Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. *Food and Bioprocess Processing*, 91(4), 481-494.
- Abul-Fadl, M. M., & Ghanem, T. H. (2011). Effect of Refractance Window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powders as compared to the convection drying method. *World Applied Sciences Journal*, 15(7), 953-965.
- Ahmad-Qasem, M. H., Barrajon-Catalan, E., Micol, V., Cárcel, J. A., & Garcia-Perez, J. V. (2013). Influence of air temperature on drying kinetics and antioxidant potential of olive pomace. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 516-524.
- Almeida, J. A., Mussi, L. P., Oliveira, D. B., & Pereira, N. R. (2015). Effect of Temperature and Sucrose Concentration on the Retention of Polyphenol Compounds and Antioxidant Activity of Osmotically Dehydrated Bananas. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1061-1069.
- Alvarado, J. D. D., & Aguilera, J. M. (2001). *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos* (No. TX541. M47 2001).
- Alzamora, S. M., Castro, M. A., Vidales, S. L., Nieto, A. B., & Salvatori, D. (2000). The role of tissue microstructure in the textural characteristics of minimally processed fruits. *Minimally processed fruits and vegetables*, 153-169.
- Alzamora, S. M., Viollaz, P. E., Martínez, V. Y., Nieto, A. B., & Salvatori, D. (2008). Exploring the linear viscoelastic properties structure relationship in processed fruit tissues. In *Food engineering: integrated approaches* (pp. 155-181). Springer New York.

- An, K., Li, H., Zhao, D., Ding, S., Tao, H., & Wang, Z. (2013). Effect of osmotic dehydration with pulsed vacuum on hot-air drying kinetics and quality attributes of cherry tomatoes. *Drying Technology*, 31(6), 698-706.
- Angelo, P. M., & Jorge, N. (2007). Phenolic compounds in foods-a brief review. *Revista do Instituto Adolfo Lutz (Impresso)*, 66(1), 01-09.
- AOAC International. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International*. AOAC International.
- Arana, J. I. (2012). 3 Textural Properties of Foods. *Physical Properties of Foods: Novel Measurement Techniques and Applications*, 53.
- Araya-Farias, M., Macaigne, O., & Ratti, C. (2014). On the development of osmotically dehydrated seabuckthorn fruits: Pretreatments, osmotic dehydration, postdrying techniques, and nutritional quality. *Drying Technology*, 32(7), 813-819.
- Asensi-Fabado, M. A., & Munné-Bosch, S. (2010). Vitamins in plants: occurrence, biosynthesis and antioxidant function. *Trends in plant science*, 15(10), 582-592.
- Azarpazhooh, E., & Ramaswamy, H. S. (2009). Evaluation of diffusion and Azuara models for mass transfer kinetics during microwave-osmotic dehydration of apples under continuous flow medium-spray conditions. *Drying Technology*, 28(1), 57-67.
- Azeredo, H. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability—a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(12), 2365-2376.
- Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 291-295.
- Bakalis, S., & Karathanos, V. T. (2005). Study of rehydration of osmotically pretreated dried fruit samples. *Drying Technology*, 23(3), 533-549.
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Uliano, P. J. (2004). Adaptation of classical processes to new technical developments and quality requirements. *Journal of food science*, 69(5), E240-E250.

- Bchir, B., Besbes, S., Attia, H., & Blecker, C. (2012). Osmotic dehydration of pomegranate seeds (*Punica granatum* L.): Effect of freezing pre-treatment. *Journal of Food Process Engineering*, 35(3), 335-354.
- Bchir, B., Besbes, S., Karoui, R., Attia, H., Paquot, M., & Blecker, C. (2012). Effect of air-drying conditions on physico-chemical properties of osmotically pre-treated pomegranate seeds. *Food and Bioprocess Technology*, 5(5), 1840-1852.
- Beristain, C. I., Azuara, E., Cortes, R., & Garcia, H. S. (1990). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *International Journal of Food Science & Technology*, 25(5), 576-582.
- Bolland, K. M. (2000). A new low-temperature/short-time drying process. *Cereal foods world*, 45(7), 293-296.
- Butera, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A. M. & Livrea, M. A. (2002). Antioxidant activities of Sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(23), 6895-6901.
- Cai, Y., Sun, M., & Corke, H. (2003). Antioxidant activity of betalains from plants of the Amaranthaceae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(8), 2288-2294.
- Cai, Y., Sun, M., Schliemann, W., & Corke, H. (2001). Chemical stability and colorant properties of betaxanthin pigments from *Celosia argentea*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(9), 4429-4435.
- Cao, H., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Du, W. H., & Sun, J. C. (2006). Optimization of osmotic dehydration of kiwifruit. *Drying Technology*, 24(1), 89-94.
- Caparino, O. A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao'var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 135-148.
- Carabasa-Giribet, M., & Ibarz-Ribas, A. (2000). Kinetics of colour development in aqueous glucose systems at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 44(3), 181-189.
- Carratu, B., & Sanzini, E. (2004). Biologically-active phytochemicals in vegetable food. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*, 41(1), 7-16.

- Castoldi, M., Zotarelli, M. F., Durigon, A., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2015). Production of tomato powder by refractance window drying. *Drying technology*, 33(12), 1463-1473.
- Chandrasekara, A., & Shahidi, F. (2010). Content of insoluble bound phenolics in millets and their contribution to antioxidant capacity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(11), 6706-6714.
- Chauhan, O. P., Singh, A., Singh, A., Raju, P. S., & Bawa, A. S. (2011). Effects of osmotic agents on colour, textural, structural, thermal, and sensory properties of apple slices. *International Journal of Food Properties*, 14(5), 1037-1048.
- Chiralt, A., & Talens, P. (2005). Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67(1), 167-177.
- Chiralt, A., Martinez-Navarrete, N., Martinez-Monzó, J., Talens, P., Moraga, G., Ayala, A., & Fito, P. (2001). Changes in mechanical properties throughout osmotic processes: Cryoprotectant effect. *Journal of Food Engineering*, 49(2), 129-135.
- Chottamom, P., Kongmanee, R., Manklang, C., & Soponronnarit, S. (2012). Effect of osmotic treatment on drying kinetics and antioxidant properties of dried mulberry. *Drying Technology*, 30(1), 80-87.
- Crozier, A., Jaganath, I. B., & Clifford, M. N. (2009). Dietary phenolics: chemistry, bioavailability and effects on health. *Natural product reports*, 26(8), 1001-1043.
- Da Silva, W. P., de Farias Aires, J. E., de Castro, D. S., da Silva, C. M. D. P., & Gomes, J. P. (2014). Numerical description of guava osmotic dehydration including shrinkage and variable effective mass diffusivity. *LWT-Food Science and Technology*, 59(2), 859-866.
- Da Silva, W. P., e Silva, C. M., Farias, V. S., & Gomes, J. P. (2012). Diffusion models to describe the drying process of peeled bananas: optimization and simulation. *Drying Technology*, 30(2), 164-174.
- Devic, E., Guyot, S., Daudin, J. D., & Bonazzi, C. (2009). Effect of temperature and cultivar on polyphenol retention and mass transfer during osmotic

dehydration of apples. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(1), 606-614.

Devic, E., Guyot, S., Daudin, J. D., & Bonazzi, C. (2010). Kinetics of polyphenol losses during soaking and drying of cider apples. *Food and Bioprocess Technology*, 3(6), 867-877.

Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(10), 3010-3014.

Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of food engineering*, 61(3), 359-364.

Falade, K. O., Igbeka, J. C., & Ayanwuyi, F. A. (2007). Kinetics of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 979-985.

García-Toledo, J. A., Ruiz-López, I. I., Martínez-Sánchez, C. E., Rodríguez-Miranda, J., Carmona-García, R., Torruco-Uco, J. G., Ochoa-Martínez, & Herman-Lara, E. (2016). Effect of osmotic dehydration on the physical and chemical properties of Mexican ginger (*Zingiber officinale* var. Grand Cayman). *CyTA-Journal of Food*, 14(1), 27-34.

Gaware, T. J., Sutar, N., & Thorat, B. N. (2010). Drying of tomato using different methods: Comparison of dehydration and rehydration kinetics. *Drying Technology*, 28(5), 651-658.

Gentile, C., Tesoriere, L., Allegra, M., Livrea, M. A., & D'alessio, P. (2004). Antioxidant Betalains from Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) Inhibit Endothelial ICAM-1 Expression. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1028(1), 481-486.

Georgiev, V. G., Weber, J., Kneschke, E. M., Denev, P. N., Bley, T., & Pavlov, A. I. (2010). Antioxidant activity and phenolic content of betalain extracts from intact plants and hairy root cultures of the red beetroot *Beta vulgaris* cv. Detroit dark red. *Plant foods for human nutrition*, 65(2), 105-111.

Giannibertolo, D. T. (2004). Present and future in process control and optimization of osmotic dehydration. *Advances in food and nutrition research*, 48, 173.

Harrison, D. G., & Gongora, M. C. (2009). Oxidative stress and hypertension. *Medical Clinics of North America*, 93(3), 621-635.

- Heimler, D., Vignolini, P., Dini, M. G., & Romani, A. (2005). Rapid tests to assess the antioxidant activity of *Phaseolus vulgaris* L. dry beans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(8), 3053-3056.
- Hernández-Santos, B., Martínez-Sánchez, C. E., Torruco-Uco, J. G., Rodríguez-Miranda, J., Ruiz-López, I. I., Vajando-Anaya, E. S., Carmona-García, R. & Herman-Lara, E. (2016). Evaluation of Physical and Chemical Properties of Carrots Dried by Refractance Window Drying. *Drying Technology*, (just-accepted). DOI: 10.1080/07373937.2015.1118705
- Ho, C. T., Mussinan, C. J., Shahidi, F., & Contis, E. T. (2010). Comparison of Spray Drying and Refractance Window Drying Technologies for the Encapsulation of Orange Oil.
- İspir, A., & Toğrul, İ. T. (2009). Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(2), 166-180.
- Jakobek, L., Šeruga, M., Medvidović-Kosanović, M., & Novak, I. (2007). Antioxidant activity and polyphenols of Aronia in comparison to other berry species. *Agriculturae Conspectus Scientificus (ACS)*, 72(4), 301-306.
- Jiratanan, T., & Liu, R. H. (2004). Antioxidant activity of processed table beets (*Beta vulgaris* var, conditiva) and green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(9), 2659-2670.
- Joshi, R., Adhikari, S., Patro, B. S., Chattopadhyay, S., & Mukherjee, T. (2001). Free radical scavenging behavior of folic acid: evidence for possible antioxidant activity. *Free Radical Biology and Medicine*, 30(12), 1390-1399.
- Kanner, J., Harel, S., & Granit, R. (2001). Betalains a new class of dietary cationized antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(11), 5178-5185.
- Kaspar, K. L., Park, J. S., Mathison, B. D., Brown, C. R., Massimino, S., & Chew, B. P. (2012). Processing of pigmented-flesh potatoes (*Solanum tuberosum* L.) on the retention of bioactive compounds. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(2), 376-382.
- Kaymak-Ertekin, F., & Sultanoğlu, M. (2000). Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of food Engineering*, 46(4), 243-250.

- Kim, K. H., Tsao, R., Yang, R., & Cui, S. W. (2006). Phenolic acid profiles and antioxidant activities of wheat bran extracts and the effect of hydrolysis conditions. *Food Chemistry*, 95(3), 466-473.
- Kowalska, H., & Lenart, A. (2001). Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables. *Journal of Food Engineering*, 49(2), 137-140.
- Kowalski, S. J., & Łechtańska, J. M. (2015). Drying of red beetroot after osmotic pretreatment: Kinetics and quality considerations. *Chemical and Process Engineering*, 36(3), 345-354.
- Kowalski, S. J., Łechtańska, J. M., & Szadzińska, J. (2013). Quality aspects of fruit and vegetables dried convectively with osmotic pretreatment. *Chemical and Process Engineering*, 34(1), 51-62.
- Kowalski, S., & Mierzwa, D. (2011). Influence of preliminary osmotic dehydration on drying kinetics and final quality of carrot (*Daucus carota* L.). *Chemical and Process Engineering*, 32(3), 185-194.
- Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International journal of food science & technology*, 36(1), 53-59.
- Kroon, P. A., Clifford, M. N., Crozier, A., Day, A. J., Donovan, J. L., Manach, C., & Williamson, G. (2004). How should we assess the effects of exposure to dietary polyphenols in vitro?. *The American journal of clinical nutrition*, 80(1), 15-21.
- Kucner, A., Klewicki, R., & Sójka, M. (2013). The influence of selected osmotic dehydration and pretreatment parameters on dry matter and polyphenol content in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 6(8), 2031-2047.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced drying technologies*. CRC Press.
- Kujala, T. S., Vienola, M. S., Klika, K. D., Loponen, J. M., & Pihlaja, K. (2002). Betalain and phenolic compositions of four beetroot (*Beta vulgaris*) cultivars. *European Food Research and Technology*, 214, 505-510.
- Kujala, T., J. Loponen, and K. Pihlaja. (2001). Betalains and phenolics in red beetroot (*Beta vulgaris*) peel extracts: Extraction and characterisation. *Zeitschrift für Naturforschung C* 56: 343-348.

- Lee, J. H., Son, C. W., Kim, M. Y., Kim, M. H., Kim, H. R., Kwak, E. S. & Kim, M. R. **(2009)**. Red beet (*Beta vulgaris* L.) leaf supplementation improves antioxidant status in C57BL/6J mice fed high fat high cholesterol diet. *Nutrition research and practice*, 3(2), 114-121.
- Lee, K. J., & Jeong, H. G. **(2007)**. Protective effects of kahweol and cafestol against hydrogen peroxide-induced oxidative stress and DNA damage. *Toxicology letters*, 173(2), 80-87.
- Lewicki, P. P., & Jakubczyk, E. **(2004)**. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 307-314.
- Lewicki, P. P., & Pawlak, G. **(2003)**. Effect of drying on microstructure of plant tissue. *Drying Technology*, 21(4), 657-683.
- Lewicki, P. P., & Porzecka-Pawlak, R. **(2005)**. Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 43-50.
- Lewicki, P. P., Kowalska, H., & Lenart, A. **(1998)**. Effect of temperature on mass transfer during osmotic dehydration of plant tissue. In *Proc. of Industrial Seminar, Industrial Application of Osmotic Dehydration Treatments of Food, Bertinoro, Italy* (pp. 44-50).
- Loginova, K. V., Lebovka, N. I., & Vorobiev, E. **(2011)**. Pulsed electric field assisted aqueous extraction of colorants from red beet. *Journal of Food Engineering*, 106(2), 127-133.
- Magoon, R. E. **(1986)**. *U.S. Patent No. 4,631,837*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Manach, C., Williamson, G., Morand, C., Scalbert, A., & Rémésy, C. **(2005)**. Bioavailability and bioefficacy of polyphenols in humans. I. Review of 97 bioavailability studies. *The American journal of clinical nutrition*, 81(1), 230S-242S.
- Manchali, S., Murthy, K. N. C., Nagaraju, S., & Neelwarne, B. **(2013)**. Stability of betalain pigments of red beet. In *Red Beet Biotechnology* (pp. 55-74). Springer US.
- Mandala, I. G., Anagnostaras, E. F., & Oikonomou, C. K. **(2005)**. Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 307-316.

- Marques, L. G., Prado, M. M., & Freire, J. T. **(2009)**. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT-Food Science and Technology*, 42(7), 1232-1237.
- Márquez, C. A., & De Michelis, A. **(2011)**. Comparison of drying kinetics for small fruits with and without particle shrinkage considerations. *Food and Bioprocess Technology*, 4(7), 1212-1218.
- Mauro, M. A., de Queiroz Tavares, D., & Menegalli, F. C. **(2003)**. Behavior of plant tissue in osmotic solutions. *Journal of Food Engineering*, 56(1), 1-15.
- Mendoza, R., & Schmalko, M. E. **(2002)**. Diffusion coefficients of water and sucrose in osmotic dehydration of papaya. *International Journal of Food Properties*, 5(3), 537-546.
- Monnerat, S. M., Pizzi, T. R., Mauro, M. A., & Menegalli, F. C. **(2006)**. Concentration profiles and effective diffusion coefficients of sucrose and water in osmo-dehydrated apples. *Food research international*, 39(6), 739-748.
- Mujumdar, A. S., & Wu, Z. H. **(2007)**. Thermal drying technologies: new developments and future R&D potential. *HEFAT 2007*.
- Murthy, K. N. C., & Manchali, S. **(2013)**. Anti-diabetic potentials of red beet pigments and other constituents. In *Red Beet Biotechnology* (pp. 155-174). Springer US.
- Neelwarne, B., & Halagur, S. B. **(2013)**. Red Beet: An Overview. In *Red Beet Biotechnology* (pp. 1-43). Springer US.
- Nemzer, B., Pietrzkowski, Z., Spórna, A., Stalica, P., Thresher, W., Michałowski, T., & Wybraniec, S. **(2011)**. Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. *Food chemistry*, 127(1), 42-53.
- Nindo, C. I., & Tang, J. **(2007)**. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying Technology*, 25(1), 37-48.
- Nindo, C. I., Feng, H., Shen, G. Q., Tang, J., & Kang, D. H. **(2003a)**. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27(2), 117-136.
- Nindo, C. I., Sun, T., Wang, S. W., Tang, J., & Powers, J. R. **(2003b)**. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in

asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *LWT - Food Science and Technology*, 36(5), 507–516.

Nindo, C. I., Tang, J., Cakir, E., & Powers, J. R. (2006). Potential of Refractance Window technology for value added processing of fruits and vegetables in developing countries. In *2006 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Nindo, C. I., Tang, J., Powers, J. R., & Bolland, K. (2004). Energy consumption during Refractance Window® evaporation of selected berry juices. *International Journal of Energy Research*, 28(12), 1089-1100.

Nindo, C. I., Tang, J., Powers, J. R., & Takhar, P. S. (2007). Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *LWT-Food Science and Technology*, 40(2), 292-299.

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

Ochoa-Martínez, C. I., & Ayala-Aponte, A. (2005). Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica mathematical. *CYTA-Journal of Food*, 4(5), 330-342.

Ochoa-Martínez, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., & Ortiz, M. J. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food engineering*, 109(1), 69-75.

Ortiz-Jerez, M. J., Gulati, T., Datta, A. K., & Ochoa-Martínez, C. I. (2015). Quantitative understanding of Refractance Window™ drying. *Food and Bioproducts Processing*, 95, 237-253.

Osorio, C., Franco, M. S., Castaño, M. P., González-Miret, M. L., Heredia, F. J., & Morales, A. L. (2007). Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. *Innovative food science & emerging technologies*, 8(3), 353-359.

- Park, K. J., Bin, A., Brod, F. P. R., & Park, T. H. K. B. (2002). Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Engineering*, 52(3), 293-298.
- Pavan, M. A., Schmidt, S. J., & Feng, H. (2012). Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. *LWT-Food Science and Technology*, 48(1), 75-81.
- Pavokovic, D., & Krsnik-Rasol, M. (2011). Complex biochemistry and biotechnological production of betalains. *Food technology and biotechnology*, 49(2), 145.
- Pavoković, D., G. Rusak, V. Besendorfer, and M. Krsnik-Rasol. (2009). Light-dependent betanin production by transformed cells of sugar beet. *Food Technology and Biotechnology* 47: 153–158.
- Pedreño, M. A., & Escribano, J. (2001). Correlation between antiradical activity and stability of betanine from *Beta vulgaris* L roots under different pH, temperature and light conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(7), 627-631.
- Perron, N. R., & Brumaghim, J. L. (2009). A review of the antioxidant mechanisms of polyphenol compounds related to iron binding. *Cell biochemistry and biophysics*, 53(2), 75-100.
- Pietta, P. G. (2000). Flavonoids as antioxidants. *Journal of natural products*, 63(7), 1035-1042.
- Piga, A., Del Caro, A., & Corda, G. (2003). From plums to prunes: influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(12), 3675-3681.
- Pitalua, E., Jimenez, M., Vernon-Carter, E. J., & Beristain, C. I. (2010). Antioxidative Activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food and Bioproducts Processing*, 88, 253–258.
- Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W., & Carle, R. (2005). Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4), 412-419.
- Prinzivalli, C., Brambilla, A., Maffi, D., Scalzo, R. L., & Torreggiani, D. (2006). Effect of osmosis time on structure, texture and pectic composition of strawberry tissue. *European Food Research and Technology*, 224(1), 119-127.

- Prothon, F., Ahrné, L. M., Funebo, T., Kidman, S., Langton, M., & Sjöholm, I. **(2001)**. Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *LWT-Food Science and Technology*, *34*(2), 95-101.
- Prothon, F., Ahrné, L., & Sjöholm, I. **(2003)**. Mechanisms and prevention of plant tissue collapse during dehydration: a critical review.
- Quiles, A., Hernando, I., Pérez-Munuera, I., Larrea, V., Llorca, E., & Lluch, M. **(2005)**. Polyphenoloxidase (PPO) activity and osmotic dehydration in Granny Smith apple. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *85*(6), 1017-1020.
- Rastogi, N. K., Angersbach, A., & Knorr, D. **(2000)**. Evaluation of mass transfer mechanisms during osmotic treatment of plant materials. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE-CHICAGO-*, *65*(6), 1016-1021.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjana, K., & Knorr, D. **(2002)**. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, *13*(2), 48-59.
- Rastogi, N., Raghavarao, K., & Niranjana, K. **(2014)**. Recent developments in osmotic dehydration. In: Sun D., *Emerging Technologies for Food Processing*. pp.181-212 London, UK: Elsevier.
- Reddy, M. K., Alexander-Lindo, R. L., & Nair, M. G. **(2005)**. Relative inhibition of lipid peroxidation, cyclooxygenase enzymes, and human tumor cell proliferation by natural food colors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(23), 9268-9273.
- Rodríguez, M. M., Rodríguez, A., & Mascheroni, R. H. **(2015)**. Color, Texture, Rehydration Ability and Phenolic Compounds of Plums Partially Osmodehydrated and Finish-Dried by Hot Air. *Journal of Food Processing and Preservation*, *39*(6), 2647-2662.
- Rosas-Mendoza, M. E., Fernández-Muñoz, J. L., & Arjona-Román, J. L. **(2011)**. Glass transition changes during osmotic dehydration. *Procedia Food Science*, *1*, 814-821.
- Rosenthal, A. J., Robin Heath, M., Prinz, J. F., Kilcast, D., Van Vliet, T., Dobraszyk, B. J., & Greaser, M. L. **(2001)**. Textura de los alimentos medida y percepción.

- Rüweler, M., Anker, A., Gulden, M., Maser, E., & Seibert, H. **(2008)**. Inhibition of peroxide-induced radical generation by plant polyphenols in C6 astrogloma cells. *Toxicology in vitro*, 22(5), 1377-1381.
- Sabarez, H. T. **(2012)**. Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. *Journal of food engineering*, 111(2), 279-288.
- Sabarez, H. T. **(2015)**. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation–Food and Nutrition Flagship, Werribee, Victoria, Australia. *Modeling Food Processing Operations*, pp. 95-105.
- Sablani, S. S., & Rahman, M. S. **(2003)**. Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International*, 36(1), 65-71.
- Sacchetti, G., Gianotti, A., & Dalla Rosa, M. **(2001)**. Sucrose–salt combined effects on mass transfer kinetics and product acceptability. Study on apple osmotic treatments. *Journal of Food Engineering*, 49(2), 163-173.
- Scott, J., Rébeillé, F., & Fletcher, J. **(2000)**. Folic acid and folates: the feasibility for nutritional enhancement in plant foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(7), 795-824.
- Sereno, A. M., Moreira, R., & Martinez, E. **(2001)**. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*, 47(1), 43-49.
- Shi, J., & Le Maguer, M. **(2002)**. Osmotic dehydration of foods: Mass transfer and modeling aspects. *Food Reviews International*, 18(4), 305-335.
- Shi, J., Pan, Z., McHugh, T. H., Wood, D., Hirschberg, E., & Olson, D. **(2008)**. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 1962–1972.
- Siddhuraju, P. **(2006)**. The antioxidant activity and free radical-scavenging capacity of phenolics of raw and dry heated moth bean (*Vigna aconitifolia*)(Jacq.) Marechal seed extracts. *Food Chemistry*, 99(1), 149-157.

- Singh, B., & Gupta, A. K. (2007). Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 459-470.
- Singh, B., Kumar, A., & Gupta, A. K. (2007). Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 471-480.
- Singh, B., Panesar, P. S., Nanda, V., & Kennedy, J. F. (2010). Optimisation of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. *Food Chemistry*, 123(3), 590-600.
- Sivakumar, V., Anna, J. L., Vijayeeswarri, J., & Swaminathan, G. (2009). Ultrasound assisted enhancement in natural dye extraction from beetroot for industrial applications and natural dyeing of leather. *Ultrasonics Sonochemistry*, 16(6), 782-789.
- Stintzing, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S & Felker, P. (2005). Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442-451.
- Stojanovic, J., & Silva, J. L. (2007). Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries. *Food chemistry*, 101(3), 898-906.
- Sugihara, N., Kishimoto, Y., Iizuka, M., Saita, E., Suzuki, K., Toyozaki, M., & Tani, M. (2009). P1431 EFFECTS OF RED BEET ON LDL OXIDATION AND REACTIVE OXYGEN SPECIES (ROS) PRODUCTION. *Atherosclerosis Supplements*, 10(2), e1481.
- Talens, P., Martínez-Navarrete, N., Fito, P., & Chiralt, A. (2002). Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(2), 191-199.
- Tan, M., Chua, K. J., Mujumdar, A. S., & Chou, S. K. (2001). Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. *Drying Technology*, 19(9), 2193-2207.
- Tesoriere, L., Butera, D., Allegra, M., Fazzari, M., & Livrea, M. A. (2005). Distribution of betalain pigments in red blood cells after consumption of cactus pear fruits and increased resistance of the cells to ex vivo induced oxidative hemolysis in humans. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(4), 1266-1270.

- Topuz, A., Dincer, C., Özdemir, K. S., Feng, H., & Kushad, M. **(2011)**. Influence of different drying methods on carotenoids and capsaicinoids of paprika (Cv., Jalapeno). *Food chemistry*, 129(3), 860-865.
- Torreggiani, D., & Bertolo, G. **(2001)**. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Engineering*, 49(2), 247-253.
- Tsai, P. J., Sheu, C. H., Wu, P. H., & Sun, Y. F. **(2009)**. Thermal and pH stability of betacyanin pigment of Djulis (*Chenopodium formosanum*) in Taiwan and their relation to antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(2), 1020-1025.
- Tsao, R. **(2010)**. Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients*, 2(12), 1231-1246.
- Van Buren JP **(1991)** In: Walter RH (ed) The chemistry and technology of pectin. Academic, New York, pp 1–22.
- Vásquez-Parra, J. E., Ochoa-Martínez, C. I., & Bustos-Parra, M. **(2013)**. Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). *Journal of Food Engineering*, 119(3), 648-654.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M. M., & Barbosa-Cánovas, G. V. **(2001)**. Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 271-289.
- Vicente, S., Nieto, A. B., Hodara, K., Castro, M. A., & Alzamora, S. M. **(2012)**. Changes in structure, rheology, and water mobility of apple tissue induced by osmotic dehydration with glucose or trehalose. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), 3075-3089.
- Visconti, R., & Grieco, D. **(2009)**. New insights on oxidative stress in cancer. *Current opinion in drug discovery & development*, 12(2), 240-245.
- Von Elbe, J. H. **(1977)**. In Current Aspects of Food Colorants, Furia. T., Ed.
- Wang, R., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. **(2010)**. Effect of osmotic dehydration on microwave freeze-drying characteristics and quality of potato chips. *Drying Technology*, 28(6), 798-806.
- Wootton-Beard, P. C., & Ryan, L. **(2011)**. A beetroot juice shot is a significant and convenient source of bioaccessible antioxidants. *Journal of functional foods*, 3(4), 329-334.

- Wrolstad, R. E., & Smith, D. E. (2010). Color analysis. In *Food analysis* pp. 573-586. Springer US.
- Yadav, B. S., Yadav, R. B., & Jatain, M. (2012). Optimization of osmotic dehydration conditions of peach slices in sucrose solution using response surface methodology. *Journal of food science and technology*, 49(5), 547-555.
- Zhou, B. O., Wu, L. M., Yang, L. I., & Liu, Z. L. (2005). Evidence for α -tocopherol regeneration reaction of green tea polyphenols in SDS micelles. *Free Radical Biology and Medicine*, 38(1), 78-84.