



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO
POR CHAROLAS Y LIOFILIZACIÓN DE CIRUELA MEXICANA
APLICANDO LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE
DE RESPUESTA”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

M. C. Cinthia Muñoz López

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Guadalupe Luna Solano

CODIRECTOR DE TESIS:

Dra. Guadalupe del Carmen Rodríguez Jiménez



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

FEBRERO 2018

*La vida es una oportunidad,
Aprovéchala.
La vida es belleza,
Admírala.
La vida es una bendición,
Disfrútala.
La vida es un sueño,
Alcánzalo.
La vida es un desafío,
Afróntalo.*

Madre Teresa de Calcuta

Agradecimientos

A mi directora de tesis Dra. Guadalupe Luna Solano por su apoyo incondicional, por la oportunidad y confianza que ha depositado en mí, por compartir sus conocimientos y experiencias, así como el tiempo y la dedicación durante la realización de este proyecto; pero sobre todo por ser una gran guía en mi camino profesional, por sus consejos para mi crecimiento personal y por brindarme su amistad. ¡Muchas gracias!

A mi codirectora de tesis Dra. Guadalupe del Carmen Rodríguez Jiménez por las aportaciones y apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Al comité revisor por sus aportes en la realización de esta tesis: Dr. Ulises Juárez Martínez, Dr. Alejandro Alvarado Lassman, Dr. Denis Cantú Lozano y Dr. Guillermo Cortes Robles.

Gracias a los profesores e investigadores del Instituto Tecnológico de Orizaba, por brindarme sus conocimientos en mi formación profesional. En especial al Dr. Denis Cantú Lozano por ser parte de mi formación académica desde licenciatura.

A la Universidad Estadual Paulista-UNESP, al personal administrativo y docente por la disponibilidad para la realización de este proyecto. Al Dr. Javier Telis Romero por todo su apoyo durante mi estadía en Brasil. A Iasnaia, Elisa, Tiago, Yara, Mariana y Arturo gracias por su hospitalidad y apoyo.

A mis amigos y compañeros del laboratorio de Bioprocesos por todos los momentos vividos, por compartir las alegrías, las dudas, los logros, y por todo el apoyo recibido para la realización de esta meta.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de este proyecto de investigación.

RESUMEN

Muñoz-López Cinthia. Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Instituto Tecnológico de Orizaba. Febrero 2018. **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO POR CHAROLAS Y LIOFILIZACIÓN DE CIRUELA MEXICANA APLICANDO LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.** Asesores: Dra. Guadalupe Luna Solano, Guadalupe del Carmen Rodríguez Jiménez.

La ciruela (*Spondias purpurea* L.) es una fruta aromática nativa de México y Centroamérica. Es la especie más cultivada en el género de las *Spondias*. La ciruela es una drupa cuyo tamaño varía entre 3 - 8 cm de diámetro. El color de la pulpa de la fruta varía de amarillo, verde o rojo, con un color de piel igualmente variable. Estas características sugieren un alto potencial comercial de la ciruela en México, así como en el mercado de exportación. Sin embargo, la comercialización de la ciruela fresca es limitada debido principalmente a daños de post-cosecha y por su fragilidad es rechazada en el mercado externo. Su industrialización es necesaria para obtener un producto con mayor resistencia y diversidad de consumo para incrementar su comercialización. En este sentido, el proceso de secado es parte fundamental en la preparación de productos con potencial de exportación. La selección de la tecnología de secado apropiada puede afectar la calidad del producto final y el costo del secado. Existe un gran número de técnicas de secado tanto tradicionales (secado por charolas) e innovadoras (liofilización), que garantizan la preservación de las propiedades de los alimentos; los métodos de secado dan lugar a productos que son capaces de recuperar las características de los alimentos frescos después de la rehidratación. Los objetivos de este trabajo fueron optimizar el proceso de secado por charolas y liofilización para obtener un producto con propiedades deseables a un menor costo de producción. La optimización de ambos procesos de secado fue realizada mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR). Se utilizó un diseño central compuesto ($2^3+2(3)+1$) para establecer las condiciones de secado. Para el proceso de secado por charolas, las variables independientes investigadas fueron temperatura de secado (50-80 °C), tiempo de secado (4-8 h) y diámetro de la muestra (1-3 cm). Para la liofilización los factores investigados fueron temperatura de

congelación (-60 - -20 °C), tiempo de liofilización (4-8 h) y diámetro de la muestra (1-3 cm). Mediante la superposición de contornos se obtuvieron las regiones factibles. Las mejores condiciones para el secado por charolas fueron una temperatura de secado de 55 °C, un tiempo de secado de 4.5 h y un diámetro de muestra de 3 cm. Bajo estas condiciones se obtuvo una producción de 0.01045 kg/h con una a_w de 0.346, contenido de humedad de 0.0085 gH₂O/ g s.s. y ΔE de 12.48, y el costo del producto fue de 40.40 \$ kg⁻¹. Las mejores condiciones de liofilización fueron una temperatura de congelación de -20 °C, un tiempo de liofilización de 4.3 h y un diámetro de la muestra de 1.4 cm. Con estas condiciones, se obtuvo una producción de 0.0038 kg/h con una a_w de 0.331, contenido de humedad de 0.0480, y ΔE de 7.65. El costo de producción de ciruela liofilizada fue de 55.88 \$ kg⁻¹.

ABSTRACT

Muñoz-López Cinthia. Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Instituto Tecnológico de Orizaba. February 2018. **OPTIMIZATION OF TRAY DRYING PROCESS AND LYOPHILIZATION OF MEXICAN PLUM USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY.** Advisors: Dra. Guadalupe Luna Solano, Guadalupe del Carmen Rodríguez Jiménez

The plum (*Spondias purpurea* L.) is an aromatic fruit native to Mexico and Central America. It is the most cultivated species in the genus *Spondias*. Plum is a drupe whose size ranges from 3 - 8 cm in diameter. The color of fruit ranges from yellow, green or red flesh, with equally varying skin colour. These characteristics suggest a high commercial potential for plum in Mexico, as well as in the export market. However, the commercialization of fresh plum is limited due mainly to post-harvest damages and its fragility avoids it to be in the external market. Its industrialization is necessary to obtain a product with a bigger resistance and consumption diversity to increase its commercialization. In this sense, drying is a fundamental stage in the preparation of products with export potential. The selection of the proper drying technology can affect the final product quality and the drying cost. Exist a large number of different drying techniques, both traditional (tray drying) and innovative (freeze drying), which guarantee the preservation of the properties of food; the drying method should a result to products that are able to recover the characteristics of the fresh food after rehydration. The aims of this work was to optimize the tray drying and freeze drying in order to obtain a dehydrated product with desirable properties at lower cost of production. The optimization of both drying processes was performed by response surface methodology (RSM). A rotatable rotatable central composite design ($2^3+2(3)+1$) was used to establish optimum drying conditions. For tray drying process, the independent variables investigated were drying temperature (50-80 °C), drying time (4-8 h) and diameter of sample (1-3 cm). For freeze drying the factors investigated were freezing drying (-60 - -20 °C), freeze drying time (4-8 h) and diameter of sample (1-3 cm). By superimposing the contour plots was obtained the feasible region. The best tray drying conditions were drying temperature of 55 °C,

drying time of 4.5 and diameter of sample of 3 cm. Under these conditions, 0.01045 kg/h of dried product was obtained, with a_w 0.346, moisture content of 0.0085 gH₂O/ g d.b. and ΔE of 12.48, and the cost of product of 40.40 \$ kg⁻¹. The best freeze drying conditions were freezing temperature of -20 °C, freeze drying time of 4.3 h and diameter of sample of 1.4 cm. Under these conditions, 0.0038 kg/h of freeze dried product was obtained, with a_w 0.331, moisture content of 0.00480 gH₂O/ g d.b. and ΔE of 7.65, and the cost of product of 55.88 \$ kg⁻¹.

Esta tesis forma parte del proyecto global “Optimización del proceso de secado por charolas y liofilización de ciruela mexicana aplicando la metodología de superficie de respuesta” que se desarrolló en el Instituto Tecnológico de Orizaba durante el periodo de Enero-2014 a Enero-2018. Con la finalidad de que los resultados de esta investigación sean fuente de información para futuros trabajos, se enlistan las publicaciones y congresos derivados de este estudio.

PUBLICACIONES

- 2018 Muñoz-López, C., G. R. Urrea-García, M. Jiménez-Fernández, G. D. C. Rodríguez-Jiménes, and G. Luna-Solano, G. Effect of drying methods on the physicochemical and thermal properties of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.). *CyTA-Journal of Food*. 16:127-134.
- 2018 Muñoz-López, C., G. R. Urrea-García, M. Jiménez-Fernández, G. D. C. Rodríguez-Jiménes, and G. Luna-Solano, G. Efecto de las condiciones de liofilización sobre las propiedades fisicoquímicas, contenido de pectina y capacidad de rehidratación de rodajas de ciruela (*Spondias purpurea* L.) *Agrociencias*.52:1-13.

PRESENTACIÓN EN CONGRESOS

- 2017 Comparación de diferentes procesos de secado aplicados a alimentos. I Foro Estudiantil de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Orizaba, Veracruz, México.
- 2016 Efecto del proceso de liofilización sobre la rehidratación de ciruela mexicana. I. Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería. Tuxtepec, Oaxaca, México.
- 2015 Comparison of tray and freeze drying on the physicochemical and thermal properties of thinly sliced Mexican plum (*Spondias purpurea* L). Attended in 29th EFFoST International Conference. Athens, Greece.
- 2015 Kinetics and thermal properties during tray drying of Mexican plum (*Spondias purpurea* L). Jornadas de Actualización en Investigación y Desarrollo de Alimentos. Veracruz, Veracruz, México

ÍNDICE

RESUMEN	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	XV
OBJETIVO GENERAL	XVIII
JUSTIFICACIÓN	XIX
	Página
CAPITULO 1. SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Ciruela mexicana (<i>Spondias purpurea</i> L.)	2
1.1.1 Composición y valor nutritivo	4
1.1.1.1 Pectina	6
1.1.1.2 Ácido cítrico	7
1.1.1.3 Ácido ascórbico (Vitamina C)	8
1.1.2 Producción y aplicaciones de la ciruela	9
1.2 Proceso de secado	11
1.2.1 Secado por charolas	13
1.2.2 Liofilización	14
1.3 Propiedades fisicoquímicas en alimentos	17
1.3.1 Actividad de agua	18
1.3.2 Humedad	20
1.3.3 Color	21
1.4 Rehidratación	23
1.5 Propiedades térmicas de los alimentos	24
1.6 Estudios realizados en ciruelas	26
1.7 Optimización	28
1.7.1 Metodología de superficie de respuesta	29
1.7.2 Aplicación de la optimización en los procesos de secado	32

CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	35
PARTE I	
2.1 Metodología general	37
2.2 Selección y acondicionamiento de la materia prima	38
2.3 Proceso de secado	39
2.3.1 Secado por charolas de la ciruela mexicana	39
2.3.1.1 Descripción del secador por charolas utilizado	39
2.3.1.2 Diseño de experimentos	40
2.3.2 Liofilización de ciruela mexicana	41
2.3.2.1 Descripción de los equipos empleados durante la liofilización	42
2.3.2.2 Diseño de experimentos	43
2.4 Análisis fisicoquímico de la ciruela	45
2.4.1 Actividad de agua	45
2.4.2 Contenido de humedad	45
2.4.3 Análisis de color	45
2.4.4 Determinación de pectina	46
2.4.5 Acidez titulable (ácido cítrico)	47
2.4.6 Contenido de ácido ascórbico (Vitamina C)	47
2.5 Análisis térmico de la ciruela	48
2.5.1 Determinación de la conductividad térmica de la ciruela	48
2.5.2 Determinación del calor específico de la ciruela	49
2.6 Medición de la energía durante el proceso de secado por charolas	49
2.7 Medición de la energía durante el proceso de liofilización	50
2.8 Evaluación de la producción y del costo del proceso de secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana	51
2.9 Optimización del proceso de secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana	52
2.10 Validación de los puntos óptimos	53
PARTE II	
2.11 Rehidratación	54

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 55

PARTE I Desarrollo experimental del secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana

3.1 Caracterización fisicoquímica de la ciruela mexicana	57
3.2 Secado por charolas de ciruela mexicana	58
3.2.1 Curvas de actividad de agua de la ciruela durante el proceso de secado por charolas	58
3.2.2 Curvas de evolución de humedad de la ciruela durante el proceso de secado por charolas	60
3.2.3 Color de la ciruela durante el proceso de secado por charolas	63
3.2.3.1 Parámetro de color L	63
3.2.3.2 Parámetro de color a	65
3.2.3.3 Parámetro de color b	66
3.2.3.4 Diferencia total de color ΔE	67
3.2.3.5 Color final de las rodajas de ciruela deshidratada	69
3.2.4 Propiedades térmicas de la ciruela durante el proceso de secado por charolas	71
3.2.4.1 Conductividad térmica	71
3.2.4.2 Calor específico	73
3.2.4.3 Propiedades térmicas al final del proceso de secado por charolas	74
3.2.5 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela deshidratada	75
3.3 Optimización del proceso de secado por charolas de ciruela mexicana	77
3.3.1 Características finales de la ciruela mexicana deshidratada	78
3.3.2 Consumo de energía, producción y costo de la ciruela mexicana deshidratada	79
3.3.3 Superficies de respuesta	81
3.3.3.1 Actividad de agua	81
3.3.3.2 Humedad	83

3.3.3.3 Diferencia total de color	85
3.3.3.4 Producción	86
3.3.3.5 Costo	88
3.3.4 Gráficos de contornos	89
3.3.4.1 Actividad de agua	89
3.3.4.2 Humedad	90
3.3.4.3 Diferencia total de color	91
3.3.4.4 Producción	92
3.3.4.5 Costo	93
3.3.5 Gráficas de superposición de contornos	95
3.3.6 Validación de los puntos óptimos	98
3.3.6.1 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela deshidratada	99
3.4 Liofilización de ciruela mexicana	100
3.4.1 Curvas de actividad de agua de la ciruela durante el proceso de liofilización	100
3.4.2 Curvas de evolución de humedad de la ciruela durante el proceso de liofilización	102
3.4.3 Color de la ciruela durante el proceso de liofilización	103
3.4.3.1 Parámetro de color L	104
3.4.3.2 Parámetro de color a	105
3.4.3.3 Parámetro de color b	107
3.4.3.4 Diferencia total de color ΔE	108
3.4.3.5 Color final de las rodajas de ciruela liofilizada	109
3.4.4 Propiedades térmicas de la ciruela durante el proceso de liofilización	111
3.4.4.1 Conductividad térmica	112
3.4.4.2 Calor específico	113
3.4.4.3 Propiedades térmicas al final del proceso de liofilización	114
3.4.5 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela liofilizada	115

3.5 Optimización del proceso de liofilización de ciruela mexicana	117
3.5.1 Características finales de la ciruela mexicana liofilizada	118
3.5.2 Consumo de energía, producción y costo de la ciruela mexicana liofilizada	120
3.5.3 Superficies de respuesta	121
3.5.3.1 Actividad de agua	121
3.5.3.2 Humedad	123
3.5.3.3 Diferencia total de color	125
3.5.3.4 Producción	126
3.5.3.5 Costo	128
3.5.4 Gráficos de contornos	129
3.5.4.1 Actividad de agua	129
3.5.4.2 Humedad	130
3.5.4.3 Diferencia total de color	132
3.5.4.4 Producción	133
3.5.4.5 Costo	134
3.5.5 Gráficas de superposición de contornos	135
3.5.6 Validación de los puntos óptimos	138
3.5.6.1 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela liofilizada	139

PARTE II Rehidratación de la ciruela mexicana

4.1 Rehidratación de ciruela mexicana	142
4.1.1 Rehidratación de ciruela deshidratada	143
4.1.1.1 Curvas de rehidratación (medio rehidratante agua)	143
4.1.1.2 Curvas de rehidratación (medio rehidratante leche)	145
4.1.1.3 Resultados finales de la rehidratación de ciruela deshidratada	148
4.1.1.4 Superficies de respuesta	150
4.1.1.4.1 Rehidratación en agua	150
4.1.1.4.2 Rehidratación en leche	152
4.1.2 Rehidratación de ciruela liofilizada	155

4.1.2.1 Curvas de rehidratación (medio rehidratante agua)	155
4.1.2.2 Curvas de rehidratación (medio rehidratante leche)	157
4.1.2.3 Resultados finales de la rehidratación de ciruela liofilizada	159
4.1.2.4 Superficies de respuesta	161
4.1.2.4.1 Rehidratación en agua	161
4.1.2.4.2 Rehidratación en leche	164
CONCLUSIONES	167
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170

LISTA DE TABLAS

		Página
Tabla 1.1	Clasificación científica de ciruela (UNAL, 2012)	2
Tabla 1.2	Composición química de la ciruela (<i>Spondias purpurea</i> L.) por 100 g (Janick y Paull, 2008; Maldonado-Astudillo <i>et al.</i> , 2014).	5
Tabla 2.1	Factores y niveles del proceso de secado por charolas	40
Tabla 2.2	Tratamientos experimentales del secado por charolas de la ciruela mexicana	41
Tabla 2.3	Factores y niveles del proceso de secado por liofilización	44
Tabla 2.4	Tratamientos experimentales del proceso de liofilización de ciruela	44
Tabla 3.1	Caracterización de la ciruela mexicana (<i>Spondias purpurea</i> L.)	57
Tabla 3.2	Resultado experimentales de los parámetros de color finales de rodajas de ciruela deshidratada	69
Tabla 3.3	Resultado experimentales de las propiedades térmicas de rodajas de ciruela deshidratada	75
Tabla 3.4	Resultado experimentales finales del contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de rodajas ciruela deshidratada	76
Tabla 3.5	Resultado experimentales finales de rodajas de ciruela deshidratada	78
Tabla 3.6	Resultados experimentales de consumo de energía, producción y costo de rodajas de ciruela deshidratada	80
Tabla 3.7	Puntos óptimos de operación para el secado por charolas de ciruela	95
Tabla 3.8	Respuestas óptimas del proceso de secado por charolas de ciruela	98
Tabla 3.9	Resultados para el contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de ciruela deshidratada	99
Tabla 3.10	Resultados experimentales de los parámetros de color de rodajas de ciruela liofilizada	109
Tabla 3.11	Resultados experimentales de las propiedades térmicas de rodajas de ciruela liofilizada	115

Tabla 3.12	Resultado experimentales finales del contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de rodajas ciruela deshidratada	116
Tabla 3.13	Resultados finales de la liofilización de ciruela mexicana	118
Tabla 3.14	Resultados experimentales de consumo de energía, producción y costo	120
Tabla 3.15	Puntos óptimos de operación del proceso de liofilización de ciruela	135
Tabla 3.16	Respuestas óptimas del proceso de liofilización de ciruela	138
Tabla 3.17	Resultados para el contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de ciruela liofilizada	140
Tabla 4.1	Resultados experimentales de la rehidratación de rodajas de ciruela deshidratada	149
Tabla 4.2	Resultados experimentales de la rehidratación de las rodajas liofilizadas	160

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Planta de ciruela en plena fructificación (Lim, 2014)	3
Figura 1.2	Ecotipos de ciruela mexicana (<i>Spondias purpurea</i> L.) (Pérez-Árias <i>et al.</i> , 2008)	4
Figura 1.3	Producción de ciruela a nivel nacional (SIAP, 2015)	10
Figura 1.4	Producción de ciruela en el estado de Veracruz (SIAP, 2014)	10
Figura 1.5	Arreglo típico de un secador de charolas: a) de doble carretilla y b) con calentadores auxiliares (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996)	14
Figura 1.6	Sistema básico de liofilización (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996)	15
Figura 1.7	Etapas de la liofilización (Ramírez-Navas, 2006)	16
Figura 1.8	Mapa de estabilidad de alimentos así como las funciones de a_w (Barbosa-Cánovas <i>et al.</i> , 2007)	19
Figura 1.9	Espacio de color Hunter L, a, b (Hunterlab, 2012)	22
Figura 1.10	Diseño compuesto central centrado en las caras para $k=3$	31
Figura 1.11	Superficie de respuesta tridimensional y gráfico de contornos (rendimiento esperado (η) en función de (x_1) y (x_2)) (Montgomery, 2005)	31
Figura 2.1	Metodología general aplicada para el secado de ciruela	37
Figura 2.2	Estado de madurez de la ciruela	38
Figura 2.3	Rodajas de ciruela: a) 1, b) 2 y c) 3 cm de diámetro	38
Figura 2.4	Secador por charolas SEM-2 Polinox	40
Figura 2.5	Ultracongelador So-Low modelo U85-13	42
Figura 2.6	Liofilizador LABCONCO Mod-742004	43

Figura 3.1	Evolución de la a_w de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50°C, b) 65 °C y c) 80 °C	59
Figura 3.2	Evolución de la humedad de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	61
Figura 3.3	Evolución del color (parámetro L) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.	64
Figura 3.4	Evolución del color (parámetro a) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	65
Figura 3.5	Evolución del color (parámetro b) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	67
Figura 3.6	Evolución en la diferencia de color (ΔE) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	68
Figura 3.7	Muestras de ciruela mexicana deshidratada en el secado por charolas	70
Figura 3.8	Evolución de la conductividad térmica de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80°C	72
Figura 3.9	Evolución del calor específico de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	73
Figura 3.10	Superficie de respuesta de a_w como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra	82
Figura 3.11	Superficie de respuesta de X como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra	83
Figura 3.12	Superficie de respuesta de ΔE como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra	85
Figura 3.13	Superficie de respuesta de producción como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra	87
Figura 3.14	Superficie de respuesta de costo como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra	88
Figura 3.15	Gráficas de contornos de a_w en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra	90

Figura 3.16	Gráficas de contornos de X en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra	91
Figura 3.17	Gráficas de contornos de ΔE en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra	92
Figura 3.18	Gráficas de contornos de producción en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra	93
Figura 3.19	Gráficas de contornos de costo en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra	94
Figura 3.20	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de secado y tiempo de secado	96
Figura 3.21	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de secado y diámetro de la muestra	96
Figura 3.22	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tiempo de secado y diámetro de la muestra	97
Figura 3.23	Comparación de muestras frescas (a) y muestras deshidratadas (b) de ciruela a las condiciones óptimas	99
Figura 3.24	Evolución de la a_w de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	101
Figura 3.25	Evolución de la humedad de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	102
Figura 3.26	Evolución del color (parámetro L) de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b)- 40°C y- 20 °C	104
Figura 3.27	Evolución del color (parámetro a) de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c)-20 °C	106
Figura 3.28	Evolución del color (parámetro b) de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, -40 °C y -20 °C	107
Figura 3.29	Evolución en la diferencia de color (ΔE) de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b)-40 °C y -20 °C	108
Figura 3.30	Muestras de ciruela liofilizada	111

Figura 3.31	Evolución de la conductividad térmica de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	112
Figura 3.32	Evolución del calor específico de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	114
Figura 3.33	Superficie de respuesta de a_w como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra	122
Figura 3.34	Superficie de respuesta de X como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra	123
Figura 3.35	Superficie de respuesta de ΔE como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra	125
Figura 3.36	Superficie de respuesta de Producción como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra	127
Figura 3.37	Superficie de respuesta de Costo como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra	128
Figura 3.38	Gráficas de contornos de a_w en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra	130
Figura 3.39	Gráficas de contornos de X en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra	131
Figura 3.40	Gráficas de contornos de ΔE en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra	132
Figura 3.41	Gráficas de contornos de producción en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra	133
Figura 3.42	Gráficas de contornos de costo en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra	134
Figura 3.43	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de congelación y tiempo de liofilización	136

Figura 3.44	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de congelación y diámetro de la muestra	136
Figura 3.45	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tiempo de liofilización y diámetro de la muestra	137
Figura 3.46	Comparación de muestras frescas (a) y muestras liofilizadas (b) de ciruela a las condiciones óptimas	139
Figura 4.1	Rehidratación de rodajas de ciruela deshidratadas por secado en charolas en agua a 10 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	144
Figura 4.2	Rehidratación de rodajas de ciruela betabel deshidratadas por secado en charolas en agua a 30 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	145
Figura 4.3	Rehidratación de rodajas de ciruela betabel deshidratadas por secado en charolas en leche a 10 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	147
Figura 4.4	Rehidratación de rodajas de ciruela betabel deshidratadas por secado en charolas en leche a 30 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C	148
Figura 4.5	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a 10 °C de rodajas de ciruela deshidratada	151
Figura 4.6	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a 30 °C de rodajas de ciruela deshidratada	151
Figura 4.7	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 10 °C de rodajas de ciruela deshidratada	153
Figura 4.8	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 30 °C de rodajas de ciruela deshidratada	154
Figura 4.9	Rehidratación de rodajas de ciruela betabel liofilizadas en agua a 10 °C: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	156
Figura 4.10	Rehidratación de rodajas de ciruela liofilizadas en agua a 30 °C: : a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	157
Figura 4.11	Rehidratación de rodajas de ciruela liofilizadas en leche a 10 °C: : a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	158

Figura 4.12	Rehidratación de rodajas de ciruela liofilizadas en leche a 30 °C: : a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C	159
Figura 4.13	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a 10 °C de rodajas de ciruela liofilizadas	162
Figura 4.14	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a 30 °C de rodajas de ciruela liofilizadas	163
Figura 4.15	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 10 °C de rodajas de ciruela liofilizadas	165
Figura 4.16	Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 30 °C de rodajas de ciruela liofilizadas	166

INTRODUCCIÓN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es una especie frutal de la familia de las Anacardiáceas, nativa de México y Centroamérica. Actualmente se cultiva en 22 estados de la república mexicana (SIAP, 2017), siendo la especie más cultivada del género *Spondias*. Este fruto, como otros frutos tropicales, es altamente perecedero y su consumo está restringido por su estacionalidad. Debido a su alto contenido de humedad ($> 78\%$) es comúnmente observado un rápido deterioro microbiológico después de la cosecha, lo que dificulta su comercialización. En algunas regiones del país, la producción de las diversas variedades de ciruela es elevada; sin embargo la falta de infraestructura debido al nulo uso de métodos de procesamiento genera una pérdida de hasta un 40% de la producción (Ramírez-Hernández *et al.*, 2008, Osuna *et al.*, 2011).

En años recientes se ha presentado un incremento en el diseño de productos novedosos a base de frutas, listos para consumir, los cuales buscan contrarrestar el bajo consumo de frutas frescas y brindar a los consumidores los beneficios que estas aportan a la salud, en términos industriales esto implica el desarrollo de operaciones que minimicen los efectos adversos de su procesamiento (Lozano-Acevedo *et al.*, 2011).

Una alternativa para la conservación y la diversificación del consumo de la ciruela mexicana es el secado. Esta operación unitaria es ampliamente empleada en la industria de los alimentos al buscar su preservación y calidad. Para ello se reduce la actividad de agua (a_w) por medio de la disminución del contenido de humedad y así eliminar un posible deterioro microbiológico y ciertas reacciones químicas. Obteniendo como resultado productos deshidratados que pueden ser consumidos directamente o utilizados como ingredientes en alimentos procesados (Jangam *et al.*, 2015).

Entre estos métodos se encuentra el secado por charolas y la liofilización que dan como resultado un producto con valor agregado, bajo peso y volumen lo cual aumenta su eficiencia en los procesos de transporte y almacenaje. Sin embargo, durante el secado la calidad de las características de los productos cambia debido a las condiciones de operación aplicadas. Por otra parte, el secado es un proceso de alto consumo energético, empleando del 10 – 15 % del consumo total de energía de países desarrollados (Erbay e Icier, 2009). Por lo que al optimizar las condiciones del secado por charolas y la liofilización se puede lograr un aumento de la producción, conservando las propiedades sensoriales y nutricionales del producto así como minimizando el consumo de energía.

La optimización es una herramienta esencial en la ingeniería de alimentos para la operación eficiente de los sistemas y del rendimiento de las unidades de procesamiento con una alta aceptabilidad del producto. La metodología de superficie de respuesta es una técnica estadística que es usada por los investigadores en la mayoría de los estudios que envuelven a la optimización. La misma metodología es usada para optimizar muchas unidades de operación en la ingeniería de procesos alimenticios empleando diseños de experimentos factoriales fraccionados. Las operaciones de procesamiento incluyen: secado, extracción de jugos y compactación (Madamba, 2002; Corzo et al., 2008).

El secado por charolas, es un método de secado convencional; que en ciertos casos es inconveniente para algunos alimentos debido a la enorme degradación que le causa, ya que los productos secados con aire caliente tienden a presentar encogimiento y colapso de tejido, características que retardan la rehidratación y cambian el aspecto agradable del producto. En el secado por charolas es necesario realizar estudios para la obtención de un producto con características organolépticas similares al producto fresco, entre las variables que tienen influencia sobre el secado se encuentran la temperatura del aire de secado y el tiempo de secado.

En el caso de la tecnología de liofilización, al ser un secado donde se aplica la sublimación, se preservan mejor las características como color, aroma, sabor y forma de los productos alimenticios (Zura-Bravo et al., 2013). Dentro de la liofilización es necesario realizar estudios para la reducción del tiempo de procesamiento, debido principalmente a su alto costo. Entre las variables que tienen más influencia se encuentran el tamaño de la muestra y su forma de congelación que afectan al tiempo de proceso y la calidad del producto final.

Es por ello que se propone realizar estudios sobre la optimización de las condiciones de operación del proceso de secado con el fin de obtener productos de buena calidad a un bajo costo de producción; en los cuales se estudien los efectos de estas sobre las propiedades fisicoquímicas de la ciruela (*Spondias purpurea* L.) durante el secado por charolas y liofilización.

OBJETIVO GENERAL

Optimizar el proceso de secado de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) por diferentes métodos de secado aplicando la metodología de superficie de respuesta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las condiciones de operación del proceso de secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana.
- Analizar el efecto del proceso de secado por charolas de la ciruela mexicana evaluando la calidad del producto obtenido en función de las condiciones de operación sobre las propiedades fisicoquímicas (actividad de agua, humedad y color), contenido de pectina y compuestos bioactivos, capacidad de rehidratación y propiedades térmicas.
- Analizar el efecto de la liofilización de la ciruela mexicana evaluando la calidad del producto obtenido en función de las condiciones de operación sobre las propiedades fisicoquímicas (actividad de agua, humedad y color), contenido de pectina y compuestos bioactivos, capacidad de rehidratación y propiedades térmicas.
- Evaluar la eficiencia energética, producción y costo total del proceso de secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana a las condiciones establecidas.
- Determinar y validar los valores óptimos de las variables de operación experimentales que minimicen el costo del proceso unitario de secado por charolas y liofilización.

JUSTIFICACIÓN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea L.*) es una importante especie frutal, la cual es rica en minerales como fósforo e hierro, así como en vitaminas, por lo que se le considera de gran potencial nutrimental y económico ya que puede ser materia prima para la industria alimenticia y farmacéutica. Sin embargo, la alta estacionalidad del producto y su corta vida de anaquel propicia que su venta se efectuó principalmente en fresco en mercados cercanos a su zona de producción.

El desarrollo dentro de la industria alimentaria de métodos de conservación que preserven los alimentos sin producir cambios importantes en sus características y valor nutritivo, supone una alternativa de interés desde el punto de vista comercial. Por otro lado el obtener productos procesados a base de frutas, permite a los consumidores disfrutar alimentos de mayor calidad y que ofrezcan los mismos beneficios que los frutos frescos.

Dentro de estos métodos, se encuentran el secado por charolas y la liofilización, que son métodos eficientes para el secado de frutas y añade valor agregado a la materia prima utilizada. Sin embargo, el secado presenta dos problemáticas: el riesgo de la alteración de la calidad nutricional y organoléptica del producto y el alto consumo energético durante la operación.

CAPÍTULO 1
SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 1. SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

1.1 Ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es originaria del sur de México y América central, donde se encuentran todavía algunas poblaciones silvestres. En México, esta fruta se distribuye a lo largo de la costa occidental de Sinaloa hasta Chiapas en la vertiente del Pacífico y desde Tamaulipas hasta la península de Yucatán en la vertiente del Golfo de México (Solórzano-Morán *et al.*, 2015).

El género *Spondias* comprende 17 especies, siete neo tropicales (México-Brasil) y diez del trópico asiático. Las especies ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.), jobo (*S. mombin* L.) y jocote (*S. radkoferi* J.D. Smith), son consideradas nativas de México y son importantes constituyentes de los bosques tropicales subcaducifolios, bosques de galería y bosques tropicales caducifolios, respectivamente (Alia-Tejacal *et al.*, 2012). La Tabla 1.1 muestra la clasificación científica de *Spondias purpurea* L.

Tabla 1.1 Clasificación científica de ciruela (UNAL, 2012).

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Rosidea
Orden	Sapindales
Familia	Anacardiaceae
Genero	<i>Spondias</i>
Especie	<i>S. purpurea</i>

Descripción botánica

Los frutales del género *Spondias* son arboles caducifolios de corteza gruesa, muy ramificados y que tienen un crecimiento promedio entre 12 y 15 m. Sus hojas son alternas de 12 a 15 cm de largo, imparipinnadas tienen pecíolo común angulado de 9

a 19 hojuelas alternas; posee flores pequeñas con 4-5 pétalos oblongos de 3 a 4 mm de largo y de coloración blanca, roja o violácea (Figura 1.1) (Lim, 2012)



Figura 1.1 Planta de ciruela en plena fructificación (Lim, 2012).

Los frutos de la ciruela mexicana son drupas redondas, oblongas u ovoides de diversos pesos y diámetros, los cuales oscilan entre 4 y 43 g y 3 a 8 cm, respectivamente (Alia-Tejacal *et al.*, 2012). El epicarpio (cáscara) es delgado, tiene una textura lisa o semilisa, y al madurar puede adquirir una coloración roja, amarilla, marrón rojiza, naranja o purpura. El mesocarpio (pulpa) es carnoso de aproximadamente 5 a 27 mm de grosor, tiene un color uniforme e intenso, que en función de la variedad será amarillo, verde o rojo violáceo; dependiendo de la variedad de ciruela hay sabores que recuerdan a la fresa entre ácidos y dulces o sabores más perfumados. Este fruto posee un endocarpio constituido por fibras en las que se hallan los restos de semillas en forma de escama el cual pierde la facultad de germinar al cabo de un mes (Pérez-Árias *et al.*, 2008; Maldonado-Astudillo *et al.*, 2014). En la Figura 1.2 se presentan diferentes ecotipos de la ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.).

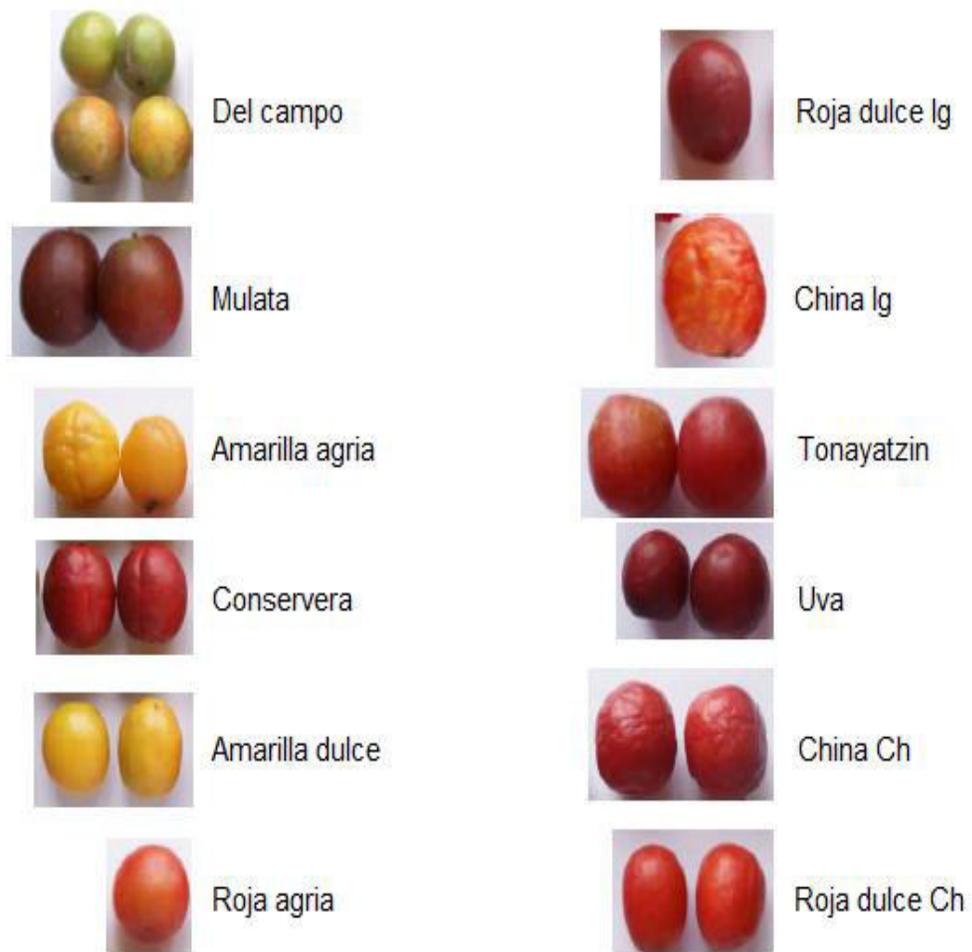


Figura 1.2 Ecotipos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) (Pérez-Árias *et al.*, 2008).

1.1.2 Composición y valor nutritivo

Los frutos de ciruela *Spondias purpurea* L tienen un alto contenido de agua, el cual varía en un rango del 65 al 87%, las proteínas y grasas son muy bajas y el calcio, fósforo, hierro y son encontrados en apreciables cantidades (Tabla 1.2) (Lim, 2012).

Tabla 1.2 Composición química de la ciruela (*Spondias purpurea* L.) por 100 g (Janick y Paull, 2008; Maldonado-Astudillo, *et al.*, 2014).

Aproximado	Intervalo		Promedio
	g		g
Humedad	65.0-87.0		77.6
Energía calorífica (kcal)	61-86		74
Proteínas	0.1-1.0		0.7
Grasas	0.03-0.8		0.2
Carbohidratos totales	8.7-22.3		19.1
Fibra	0.2-0.7		0.5
Cenizas	0.3-1.1		0.7
Minerales	mg		mg
Calcio	6-25		17
Hierro	0.09-1.22		0.72
Fósforo	32-56		42
Sodio	2-9		6
Potasio	230-270		250
Zinc	-		20
Vitaminas	mg		mg
Ácido Ascórbico	7.36-88.1		49
Tiamina	0.033-0.110		0.084
Rivoflamina	0.014-0.080		0.04
Niacina	0.4-1.8		1
C-Caroteno	0.004-0.225		0.019
Composición de la pulpa	Unidades		
pH	%	2.5-6.0	3.29
Sólidos solubles totales	g		18
Almidón	g		2.47
Pectinas	g	0.13-0.28	0.22
Fructuosa	g		2.53
Glucosa	g		2
Azúcares reductores	g		8.08
Sucrosa	g	5.97-7.21	6.59
Ácido cítrico	%	0.2-2.0	30
Ácido málico	mg		110
Ácido oxálico	mg		30
Ácido tartárico	mg		20

El contenido de ácido en la fruta es normalmente determinada por titulación ácida y expresada como porcentaje de ácido cítrico, dado que es el ácido orgánico predominante en esta fruta (Ramírez-Hernández *et al.*, 2008). La acidez titulable de las variedades de ciruela *Spondias purpurea* analizadas en México, se encuentra en un rango de 0.2 - 2.0 %; además el pH de la fruta oscila entre 2.5 y 6.0 dependiendo de la variedad y región de producción (Vargas-Simón *et al.*, 2011).

La ciruela presenta apreciables cantidades de compuestos antioxidantes (ácido ascórbico) y fibra dietética (celulosa, hemicelulosa, lignina y pectinas), los cuales juegan un rol importante en la prevención de enfermedades crónico degenerativas. El contenido de ácido ascórbico (vitamina C) en la *Spondias purpurea* se ha reportado en un rango de 7.36 - 88.1 mg/100 g, el cual es alto en comparación con otras frutas tropicales, incluyendo el zapote mamey, la piña y la papaya. En lo que respecta al contenido de pectina en la fruta fresca varía de ligeramente entre 0.13-0.28 % (Maldonado-Astudillo *et al.*, 2014).

Las ciruelas rojas contienen antocianinas y las amarillas beta carotenos (que se localizan en la piel y pulpa y son responsables de color) compuestos con actividad igualmente antioxidante que pueden ayudar a disminuir el riesgo de enfermedad cardiovascular (Alia-Tejacal *et al.*, 2012).

La ciruela posee en general una mayor densidad calórica en comparación que otras drupas como lo son los duraznos, albaricoques, mangos y cerezas. Esta alta densidad calórica es atribuida principalmente a la alta concentración de carbohidratos totales como lo son fructosa, glucosa y sucrosa que en conjunto representan el 65 % de la materia soluble (Lim, 2012).

1.1.1.1 Pectina

La pectina, junto con la celulosa y la lignina, es un componente estructural de la pared celular primaria y media de los tejidos vegetales y constituye parte de la fibra soluble presente en las frutas (Maldonado-Astudillo *et al.*, 2014). Este polisacárido

consiste en polímeros del ácido D-glacturónico unidos mediante enlaces α -(1→4) con un número variable de ésteres metílicos (Badui, 2006), el cual debido a sus propiedades gelificantes ha sido ampliamente empleado en la industria de los alimentos como texturizante, emulsificador y estabilizador; agente gelificante en mermeladas y jaleas, además de ser empleada para estabilizar productos de confitería, productos lácteos, preparaciones de frutas, rellenos de panadería, glaseados y otras aplicaciones incluyen el ser sustitutos de grasas, aderezos para ensaladas, helados y como emulsificante de productos cárnicos (Ismail *et al.*, 2012).

Las pectinas comerciales son extraídas de los subproductos de la industria alimenticia como son cáscaras de cítricos, residuos de extracción del zumo de cítricos, aceite y pulpa de manzana y el residuo seco de la extracción de jugo de manzana (Monsoor, 2005; Chan y Choo, 2013).

Los beneficios del consumo de pectina incluyen un incremento en el crecimiento natural de bacterias en el tracto digestivo, lo cual promueve el proceso de digestión; además, disminuye los niveles de colesterol en la sangre y las fracciones de lipoproteínas de baja densidad del colesterol, lo cual es beneficioso para la salud humana (Liu *et al.*, 2006). De acuerdo con la FAO (1969), la pectina es considerado un alimento seguro que puede ser ingerido diariamente sin límites (Ismail *et al.*, 2012).

1.1.1.2 Ácido cítrico

El ácido cítrico es un compuesto orgánico intermedio en el ciclo del ácido tricarboxílico (TCA), el cual se encuentra naturalmente en las frutas cítricas, piñas, peras y cristalizado como citrato de calcio. Este ácido fue inicialmente aislado del jugo de limón; actualmente la producción comercial de ácido cítrico se realiza mediante procesos de fermentación de sacarosa empleando como organismo de fermentación *Aspergillus niger* principalmente. Sin embargo, una pequeña cantidad de ácido cítrico es producida a partir de frutos cítricos en México y América del Sur, donde estos frutos tienen disponibilidad económica.

Es el ácido orgánico más empleado en la industria farmacéutica y de los alimentos. Este acidulante es adicionado en los alimentos como amortiguador de pH, agente dispersante, saborizante, secuestrador y para acelerar el curado de los derivados cárnicos. Además también es un aditivo eficaz para inhibir las reacciones de oscurecimiento o pardeamiento que se produce en las superficies cortadas de algunas frutas y vegetales (Badui, 2006).

Consumido en frutos y zumos, el ácido cítrico brinda diversos beneficios a la salud, ya que posee propiedades antioxidantes que ayudan a prevenir el daño celular producido por los “radicales libres” los cuales oxidan las proteínas, los ácidos grasos y el ácido desoxirribonucleico en el organismo. El daño de los radicales libres ha sido implicado en favorecer el avance progresivo de enfermedades tales como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y la formación de cataratas (Economos y Clay, 1998); asimismo garantiza el correcto funcionamiento de los riñones, debido a la capacidad del ácido cítrico para quelar las propiedades alcalinizantes del calcio, previniendo la formación de cálculos renales.

1.1.1.3 Ácido ascórbico (Vitamina C)

El ácido ascórbico está conformado por cuatro isómeros, de los cuales solo el L-ascorbico y el L-deshidroascórbico tienen actividad fisiológica como vitamina C. El ácido ascórbico es una sustancia cristalina blanca y sin color; debido a sus características polares, es soluble en agua y su solubilidad en medios acuosos, tales como etanol y acetronitilo, es limitada. Esta vitamina en su estado puro es estable cuando es expuesta al aire, luz y temperatura ambiente por prolongados periodos de tiempo. Sin embargo, en soluciones acuosas como los alimentos, su estabilidad está relacionada con las condiciones de almacenamiento y la composición de la matriz. En estos casos la vitamina C puede degradarse, debido a cambios en el pH, temperatura, luz, y la presencia de enzimas, oxígeno y catalizadores metálicos. Por lo cual muchos estudios toman a la vitamina C como un indicador de calidad (Santos y Silva, 2008).

Al igual que otros ácidos orgánicos, actualmente el interés en el estudio de la vitamina C se centra en su capacidad para realizar funciones antioxidantes las cuales pueden reducir el riesgo de contraer enfermedades crónicas. La vitamina C desempeña un papel clave en la formación de colágeno (componente primario del tejido conectivo del cuerpo), promueve la absorción de hierro inorgánico, y ayuda en tratamientos de la anemia y el estrés (Solórzano-Moran *et al.*, 2015).

En México la ingesta diaria recomendable para satisfacer las necesidades nutricionales de vitamina C en adultos es de 60 mg/día y para niños menores de 3 años de 40 mg/día (Badui, 2006). Sin embargo algunos estudios recientes muestran que el consumo de 200 mg/día de vitamina C puede ser óptimo para la prevención de enfermedades. Un exceso de vitamina C (>500 mg) puede ser peligroso debido al aumento de hierro en la sangre (Economos y Clay, 1998). Consumir cinco porciones de frutas (cítricos, fresa, naranja, piña y durazno) y verduras (espinacas, chicharos, cebolla y tomate) al día puede resultar en un consumo de alrededor de 200 mg de vitamina C.

1.1.2 Producción y aplicaciones de la ciruela

En México las variedades cultivadas de ciruela pueden dividirse en dos grupos: aquellos que fructifican durante la estación seca (febrero a mayo); y los que fructifican al final de la estación lluviosa (septiembre a diciembre) (Osuna *et al.*, 2011). La producción nacional de ciruela para el 2016 fue de 77,930.89 toneladas; siendo los principales productores Chiapas, Michoacán, Jalisco, Puebla, Guerrero, Zacatecas, Veracruz y Sinaloa, quienes aportaron el 88% de la producción (SIAP, 2017).

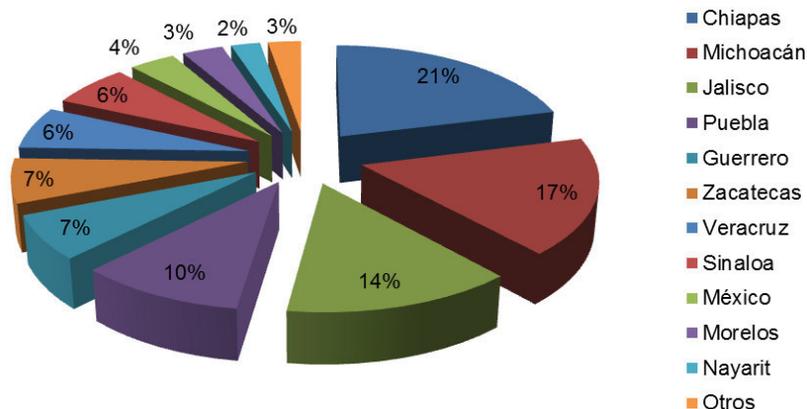


Figura 1.3 Producción de ciruela a nivel nacional (SIAP, 2017).

En lo que respecta al estado de Veracruz, durante el año 2016 el estado ocupó el séptimo lugar en producción con 4,928.85 toneladas. En la Figura 1.4 se muestra la producción de ciruela por municipio reportado para el año 2016, por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de México (SIAP, 2017).

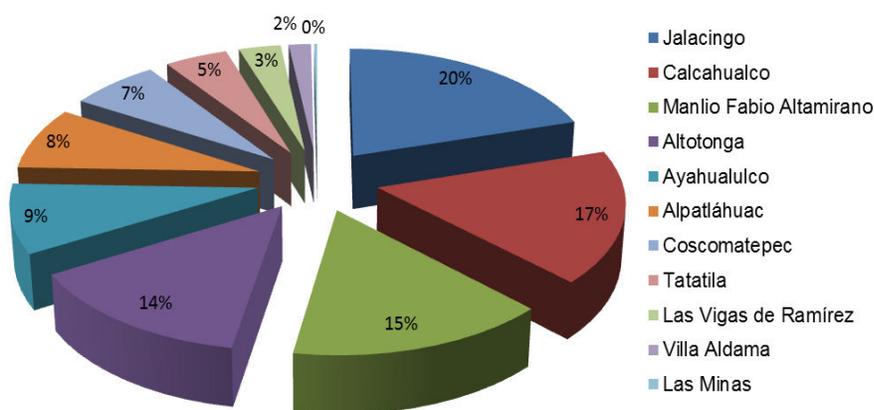


Figura 1.4 Producción de ciruela en el estado de Veracruz (SIAP, 2017).

Aunque es considerada un fruto exótico que posee un alto potencial para su comercialización y exportación, la mayor parte de la ciruela producida en México es comercializada en lugares cercanos a su zona de (Maldonado-Astudillo *et al.*, 2014). Osuna *et al.* (2011) indican que el problema central de estos frutos es su corto periodo de almacenamiento después de la cosecha, lo que dificulta su comercialización.

Habitualmente en México el fruto maduro se consume en fresco; sin embargo, artesanalmente se emplea para producir “ciruela negra”, el proceso consiste en colocar la fruta en almíbar y dejarla cocer a fuego lento hasta que el azúcar se concentre. Además, debido a su contenido de pectina puede ser empleada en la producción de mermeladas y jaleas. Otro uso de la pulpa incluyen la elaboración de atole, mezclado con harina de maíz y azúcar, y encurtidos con vinagre (Lim, 2012). Sin embargo, este fruto puede ser empleado para la elaboración de nieves, salsas, postres, mermeladas, deshidratados, confituras, licores y aguas (Alia-Tejagal *et al.*, 2012).

En la medicina tradicional se le usa en el tratamiento de diversos tipos de ulcera y disentería (Lim, 2012). En Filipinas se reporta el uso del jocote en diversas estomatitis infantiles (Mendoza, 2009). Finalmente, se reconoce que esta fruta es una fuente importante de compuestos antioxidantes, por lo cual existe un especial interés de la industria cosmetológica y farmacéutica. Estudios recientes sugieren que el consumo de estos frutos ayudan a retrasar el desarrollo de procesos degenerativos como el Alzheimer y Parkinson, así como la artritis y la aterosclerosis (acumulación de depósitos adiposos llamados placa en el interior de las paredes de las arterias) (Rodríguez *et al.*, 2010; Solórzano-Moran *et al.*, 2015).

1.2 Proceso de secado

El secado de los alimentos es un fenómeno complejo que implica procesos de transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa. Por lo que se define mejor la deshidratación como la operación básica por la que el agua que contiene un sólido o una disolución (generalmente concentrada) se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre ambas fases.

Todas las operaciones de secado dependen de la aplicación de calor para vaporizar el agua o los constituyentes volátiles. El mecanismo que regula el secado de un producto en forma de partículas depende de la estructura de éste y de los parámetros de secado como contenido de humedad, dimensiones del producto,

temperatura del medio de calentamiento, velocidades de transferencia superficiales y contenido de humedad en equilibrio (Sharma *et al.*, 2003).

El propósito del secado o deshidratación de materiales biológicos (en especial los alimentos), es aumentar su vida de anaquel, mediante la reducción de la actividad de agua, lo que inhibe el crecimiento microbiano y la actividad de las enzimas. Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua.

Adicionalmente al incremento en la estabilidad del producto, se tiene una reducción significativa en el peso y el volumen de este, contribuyendo en la reducción del costo de empaque, manejo, almacenamiento y distribución del alimento. Durante el proceso de secado, el material alimenticio experimenta cambios físicos, químicos y biológicos, que pueden afectar algunos atributos naturales de este como la textura, color, sabor y valor nutricional (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2010).

Otro de los objetivos que se persiguen con la deshidratación de alimentos es la transformación de éstos en materias primas adecuadas para el mezclado y formulación de nuevos productos u obtener formas físicas deseadas (por ejemplo, polvo, copos, gránulos) como en el caso de las sopas deshidratadas, frutas y cereales para desayuno, etc.

Sin embargo, este proceso también puede afectar la calidad nutritiva y el sabor de los alimentos (Sharma *et al.*, 2003), es por ello que durante el procesamiento y manejo de los alimentos se busca mejorar y preservar sus cualidades originales al favorecer o evitar cambios que tengan que ver con la aceptación o rechazo, su utilidad, su calidad nutricional o su seguridad al no tener compuestos o sustancias tóxicas. La temperatura y la exposición prolongada al oxígeno presentes en el secado, son factores importantes que producen o favorecen cambios en los alimentos. El estudio de estos cambios generalmente se hace mediante técnicas de

cinéticas químicas u otros procedimientos de análisis más complicados (Villegas-Santiago *et al.*, 2011).

Por lo cual los procesos de secado se clasifican de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua: (1) en la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire; (2) en el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se tiende indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación (también pueden usarse bajas temperaturas con vacío para ciertos materiales que se decoloran o se descomponen a temperaturas altas); (3) en la liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado.

1.2.1 Secado por charolas

El más sencillo y económico de los mecanismos de secado es el secador de charolas. En este tipo de secador el producto a secar se dispone en bandejas u otros accesorios similares exponiéndolo a una corriente de aire caliente en el recinto cerrado. El aire circula sobre la superficie del producto a relativamente alta velocidad para aumentar la eficiencia de la transmisión de calor y transferencia de materia (Singh y Heldman, 2009) Las temperaturas típicas empleadas en el secado de alimentos sólidos oscilan entre los 40-90 °C y el tiempo de exposición al calor debe de ser controlado, ya que puede causar fenómenos de deterioración los cuales deben de ser evaluados y controlados para mantener una calidad adecuada.

El secador puede tener espacio para 10, 20 o más charolas. Pueden ser entrepaños de fondo sólido con el aire circulando a través de la parte superior e inferior del entrepaño o pueden tener una base de malla con la circulación del aire controlada, de tal manera que pase a través de la charola y los sólidos que contiene (Foust *et al.*, 2006). La Figura 1.5 ilustra algunos ejemplos de secadores de charolas.

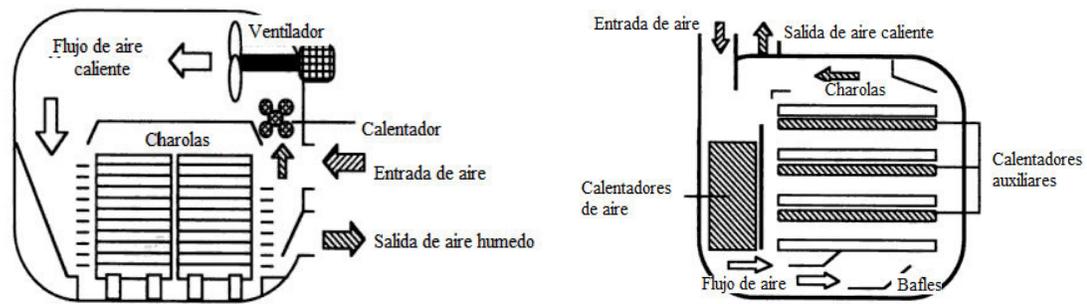


Figura 1.5 Arreglo típico de un secador de charolas: a) de doble carretilla y b) con calentadores auxiliares (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

Debido a que las condiciones dentro de estos secadores se controlan con facilidad; estos son adecuados para secar materiales que requieren modificar las condiciones de secado a medida que este avanza; estos sistemas se usan generalmente para deshidratar frutas y vegetales en rodajas, trozos o enteros; otros materiales procesados son las semillas, flores, raíces y hojas. El secador por charolas también permite deshidratar semisólidos como pulpas, purés y orujos (Ratti, 2009).

En la mayoría de los casos los secadores de charolas operan por cargas, además de que tienen la desventaja de no secar el producto de forma uniformemente, es decir dependiendo de su posición en el secador es el resultado que se obtendrá (Singh y Heldman, 2009). Debido a esto, las charolas cercanas a la entrada de aire estarán sujetas a condiciones bastante distintas de las que se encuentran ubicadas cerca del final de la trayectoria de flujo de aire. Como resultado, el material se seca con rapidez en algunos entrepaños, mientras que en otros se seca con menor velocidad que el promedio (Foust *et al.*, 2006).

1.2.2 Liofilización

La liofilización es un proceso de conservación donde el agua u otro solvente es removido del producto congelado por sublimación. La sublimación ocurre cuando el solvente congelado pasa directamente a la fase gaseosa sin pasar por la fase líquida. (Velardi y Barresi, 2008).

Comparado con los métodos clásicos de secado, las mayores ventajas de la liofilización son: (I) la preservación de la mayoría de las propiedades del material fresco como forma, apariencia, sabor, color, textura, etc. y (II) la alta capacidad de rehidratación del producto liofilizado (Hammami y Rene, 1997; Çalışkan y Dirim, 2017). Por otro lado una de sus limitantes es el alto consumo energético durante el proceso de liofilización (Huang *et al.*, 2009), sin embargo, el empleo de este método se justifica ya que la naturaleza del producto liofilizado es alterada difícilmente.

Los vegetales, frutas finas, carne y pescado al igual que los alimentos “instantáneos” como sopas y extractos (té y café); además de otros productos, los cuales poseen sustancias sensibles a altas temperaturas, como: las proteínas, enzimas o moléculas termolábiles son algunos de los productos que se liofilizan (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996). La Figura 1.6 muestra la configuración básica de la liofilización.

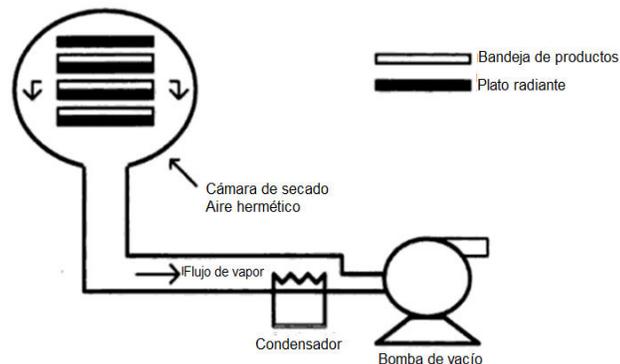


Figura 1.6 Sistema básico de liofilización (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

La liofilización involucra dos etapas secuenciales: (1) el producto es congelado, (2) el producto es secado por sublimación directa del hielo presente en el alimento bajo condiciones de presión reducida (Orrego, 2003).

Congelación: La etapa de congelación tiene una gran influencia en la eficiencia global del proceso de liofilización ya que establece la estructura de los cristales de hielo (forma y tamaño), los cuales afectan a la transferencia de masa y calor en las

etapas posteriores (Reyes *et al.*, 2008). Cuando se crea una capa de hielo, se crea una red uniforme en todo el producto que después de la sublimación produce una matriz porosa densa, en general, la congelación rápida genera cristales pequeños de hielo. Por lo contrario, la congelación lenta genera cristales de hielo grandes (Ceballos *et al.*, 2012). Por lo tanto, la velocidad de rehidratación es crítica para definir las propiedades del producto final, debido a que afecta al tamaño de poro que se produce después de la sublimación del hielo y mejorar el flujo másico durante la deshidratación y reconstitución.

La temperatura y el tiempo de congelación se encuentran en función de la concentración de los solutos en la solución. En el caso de los alimentos la temperatura de congelación es menor que la temperatura de congelación del agua pura. Una inadecuada congelación da lugar a la formación de sustancias espumosas o gomosas las cuales aparecerán en el producto final. Al final del proceso de congelación se obtendrá una masa que deberá de ser rígida, formando una mezcla eutéctica consistente en cristales de hielo y componentes alimenticios la cual es requerida para lograr remover el agua por sublimación (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2010).

El secado por sublimación del hielo (o solvente congelado) del producto congelado, generalmente a muy baja presión, se estudia a dos etapas (Figura 1.7): etapa primaria y secundaria de secado.

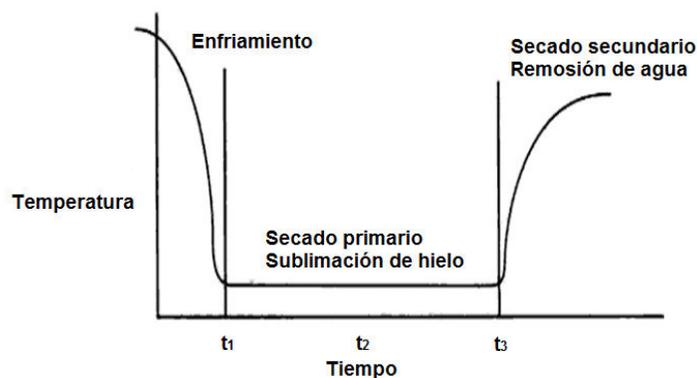


Figura 1.7. Etapas de la liofilización (Ramírez-Navas, 2006).

Etapa primaria En esta etapa se realiza la sublimación. El hielo se sublima cuando la energía del calor latente es suministrada. En este periodo la mayor parte de agua es removida (65-90%)

Durante el secado primario, los cristales de hielo formados durante la congelación son evaporados. La presión de la cámara de vacío se reduce por debajo de la presión de vapor del hielo, y la temperatura de almacenamiento se eleva al suministrar el calor, eliminando el hielo por sublimación. Al final de secado primario, el producto aún puede contener entre 15-20 % de agua aproximadamente, que luego se elimina durante la etapa de secado secundario.

Etapa secundaria: esta etapa involucra la remoción del agua no congelada (agua ligada) e inicia cuando el hielo ha sido removido por sublimación. El agua ligada (10-35% del total de contenido de humedad), es removida bajo vacío para eliminar el agua que no se cristalizó previamente y que está ligada muy fuertemente a la masa parcialmente seca. Durante esta etapa la humedad residual disminuye progresivamente hasta obtener el nivel deseado, que dependerá del producto y del tiempo que se desee preservar (Reyes, 2008).

La liofilización da lugar a productos alimenticios de más alta calidad que con cualquier método de secado. El factor principal es la rigidez estructural que se preserva en la sustancia congelada cuando se verifica la sublimación. Esto evita el colapso de la estructura porosa después del secado. Las temperaturas bajas que se emplean reducen al mínimo las reacciones de degradación que casi siempre ocurren en los procesos comunes del secado (Geankoplis, 1998).

1.3 Propiedades fisicoquímicas de los alimentos

El secado de materiales alimenticios no solamente afecta el contenido de agua del producto, sino que altera y produce cambios físicos y químicos que influyen en la calidad final del producto; por lo que en la producción de cualquier alimento deshidratado no sólo es necesario optimizar la operación en términos de volumen de

producción o costo, sino que además es requisito fundamental ofrecer productos que satisfagan las necesidades y requerimientos del consumidor (Barbosa-Canovas y Vega-Mercado, 1996).

El conocimiento de la influencia del secado sobre las propiedades fisicoquímicas de los alimentos, especialmente frutas y vegetales, se puede utilizar para evaluar y definir las características finales, vida útil y precio del producto deshidratado. Las investigaciones llevadas a cabo en este campo han permitido minimizar los aspectos negativos de los productos deshidratados de manera que las industrias de este sector ofrecen al mercado mayor calidad, es decir, productos secos de rápida constitución que poseen propiedades sensoriales lo más parecidas a las del alimento fresco.

1.3.1 Actividad de agua

En los sistemas biológicos, como los alimentos, el agua se encuentra como: agua libre constituida por el agua superficial, agua de hinchamiento y agua retenida en los capilares; y agua ligada formada por el agua absorbida o ligada por enlaces iónicos o fuerzas de Van der Waals y puentes de hidrogeno (Barreiro y Sandoval, 2006).

Del agua libre contenida en un alimento dependen las propiedades reológicas y de textura de éste, pero también es responsable en gran medida de las reacciones responsables del deterioro de un producto. La actividad de agua (a_w) permite medir la porción de agua (agua libre) que actúa como un solvente para favorecer las reacciones enzimáticas y químicas que influyen en la estabilidad antioxidante, color, sabor y valor nutricional. Además, es empleada para predecir la estabilidad y seguridad de los alimentos, y como condición de equilibrio que determina el límite del proceso. (Henríquez *et al.*, 2013).

Este concepto es definido matemáticamente como:

$$a_w = \frac{p}{p_o} = \frac{HR}{100} \quad \text{Ec. 1.1}$$

donde a_w es la actividad de agua (que va de valores de 0 a 1), p es la presión parcial ejercida por el agua del alimento (Pa, kPa o mmHg), p_o es la presión de vapor del agua pura (Pa, kPa o mmHg) y HR es humedad relativa de equilibrio (%).

Como se puede apreciar en la ecuación antes presentada, la actividad de agua (a_w) representa la humedad relativa ambiental (generalmente aire u otro gas que rodee al alimento) que se encuentra en equilibrio termodinámico con el agua presente en el alimento (Barreiro y Sandoval, 2006).

En la industria de la preservación de alimentos a partir del secado, el estudio del efecto de la a_w va más allá de la estabilidad microbiológica (Figura 1.8), tiene una influencia en otras reacciones de deterioro de tipo químico y bioquímico, las cuales deben de considerarse siempre en forma conjunta para el efecto global.

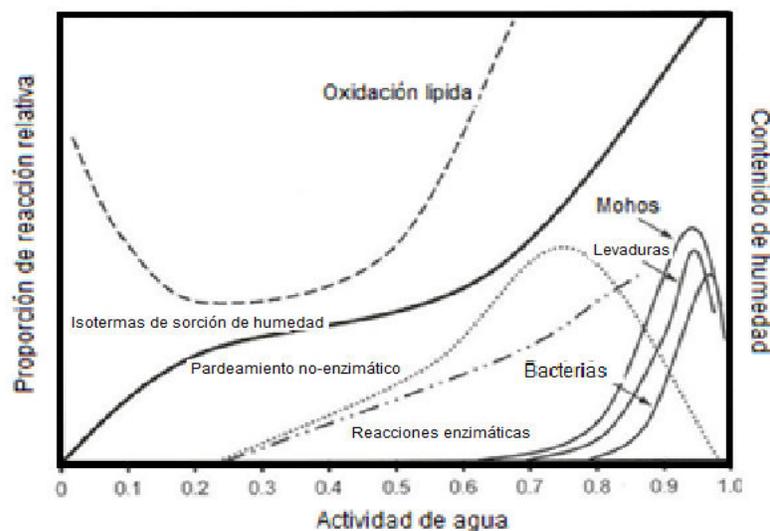


Figura 1.8 Mapa de estabilidad de alimentos así como las funciones de a_w (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2007).

Perussello *et al.* (2009) menciona que los microorganismos no pueden crecer en alimentos deshidratados, cuando el intervalo de a_w es menor que 0.6-0.7. La deshidratación se basa en la eliminación del agua, por lo que esta no está disponible para promover el crecimiento microbiano. Ninguna de las bacterias patógenas que son asociadas con los alimentos, tales como *Clostridium* o *Vibrio spp.*, causantes del

botulismo y del cólera, pueden multiplicarse con valores de a_w por debajo de 0.9; por lo tanto el secado es el método más efectivo para prevenir el crecimiento de bacterias que causan intoxicaciones alimenticias (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2007).

1.3.2 Humedad

En la mayoría de los equipos de secado el producto a secar está en contacto con una mezcla de aire-vapor de agua (aire con algún grado de humedad). Si un alimento sólido húmedo se pone en contacto con aire de temperatura y humedad constantes, como sucede cuando se usa aire en exceso, después de un tiempo suficiente el sólido alcanzará una humedad de equilibrio que depende de la humedad y temperatura con el que estuvo en contacto (Orrego, 2003).

En los alimentos, el contenido de agua se reduce por debajo del 10 % en peso, ya que a este valor los microorganismos dejan de ser activos. Sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5 % en peso en los alimentos, para preservar su sabor y su valor nutritivo. Los alimentos secos pueden almacenarse durante periodos bastante largos (Geankoplis, 1998).

En los procesos de secado, la humedad del alimento debe de ser medida como una función del tiempo para obtener las cinéticas de secado. El contenido de humedad X es usualmente calculado en base seca como la relación de la cantidad de agua en la muestra y la cantidad de solido seco (Ratti, 2009):

$$X = \left(\frac{m_x - m_s}{m_s} \right) \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde m es la masa total de la muestra al tiempo t y m_s es la masa del solido seco. La relación entre el contenido de humedad en base seca y húmeda está dada por:

$$X_w = \left(\frac{X}{1+X} \right) \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde X_w es el contenido de agua en base húmeda.

En los cálculos de secado resulta más adecuado referir la humedad en base seca debido a que esta permanece constante a lo largo del proceso de secado, por lo cual se entenderá por humedad de un sólidos el peso de agua que acompaña a la unidad de peso del sólido seco (Nuñez-Galindo, 2016).

1.3.3 Color

La medición de color de los productos alimenticios ha sido empleada como un indicador indirecto de otros atributos de calidad como lo son el sabor y el contenido de pigmentos; debido a su simplicidad, rapidez y su fácil correlación con otras propiedades fisicoquímicas (Greiby *et al.*, 2013).

El color es uno de los atributos más importantes de los productos deshidratados, desde que este influencia la aceptabilidad del consumidor. La primera cualidad que juzga el consumidor es la apariencia, la cual es afectada negativamente por el secado.

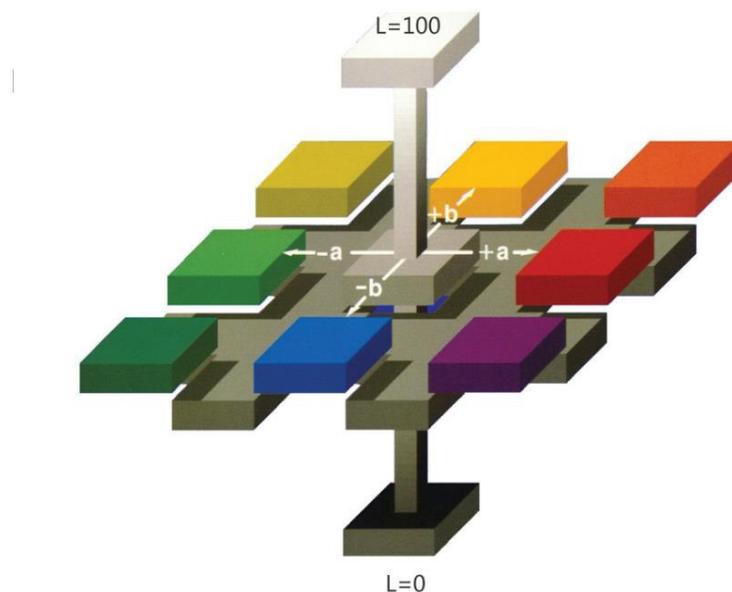
Muchas reacciones deteriorativas que afectan el color de los productos deshidratados son iniciados durante su procesamiento, y continúan durante el almacenamiento. El color de los materiales alimenticios térmicamente tratados cambia debido a cambios químicos, como lo son la degradación de pigmentos (especialmente carotenoides y clorofilas), reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard y la oxidación de ácido ascórbico) y de pardeamiento de tipo enzimático (polinofenoloxidasas); además, los alimentos deshidratados también cambian su color debido a la oxidación de moléculas altamente insaturadas por la exposición al aire durante el procesamiento (Marquez *et al.*, 2013).

Cuando el deterioro del color es visualmente extenso, el producto resulta inaceptable, por lo que industrialmente el color puede ser una característica determinante para el éxito comercial de innumerables productos; por lo tanto la determinación del color por métodos objetivos resulta importante para la descripción

de los cambios de color y es una herramienta útil para el control de calidad de los productos alimenticios.

El sistema **L, a, b** de Hunter se desarrolló tomando como base la teoría de los colores opuestos de Hering; con las cuales se establecen coordenadas triestimulo dentro de un espacio cartesiano (Figura 1.9). El parámetro **L** es una medición aproximada de la luminosidad, y representa la aproximación matemática de la respuesta del ojo al negro y blanco., mientras que los parámetros **a** y **b** representan la cromaticidad (Lewicki, 1998). Las escalas de estos parámetros se describen a continuación:

- **Escala L (negro vs blanco)**, donde los valores van de 0 (negro) a 100 (color blanco), los valores bajos (0-50) indican colores oscuros, y los valores altos (51-100) indican colores claros.
- **Escala a (verde vs rojo)**, donde los valores negativos indican colores verdes, y los valores positivos indican colores rojos.
- **Escala b (azul vs amarillo)**, donde los valores negativos indican colores azules y los valores positivos indican colores amarillos.



- **Figura 1.9** Espacio de color Hunter **L, a, b** (Hunterlab, 2012).

Las variables del sistema de color de Hunter, han sido empleadas para correlacionar los tipos y cantidades de pigmentos presentes en los alimentos con resultados favorables (Özkan *et al.*, 2003); además, proveen información útil para el control de calidad de frutas y verduras durante su procesamiento térmico, ya que el color de estos cambia debido a las reacciones ocurridas en el interior del material alimenticio, alterando sus características superficiales y por lo tanto su color final (Beaudry *et al.*, 2004; Franceschinis *et al.*, 2015)

1.4 Rehidratación

La rehidratación puede ser considerada como un indicador de los daños que los materiales alimenticios presentan durante el secado (Marquez *et al.*, 2013; Zura-Bravo *et al.*, 2013). De acuerdo con Contreras *et al.* (2012) el proceso de rehidratación y la calidad de los productos rehidratados dependen en gran medida de los cambios estructurales y de composición que se producen en los tejidos y células vegetales durante el procesamiento.

Durante la rehidratación, la absorción de agua en el tejido resulta en un incremento de masa; se puede mencionar que el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o con solución hidratante. De esta manera la absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta sucesivamente el volumen del mismo (Marín *et al.*, 2006). Simultáneamente, también ocurre la lixiviación del soluto (azúcares, ácidos, minerales y vitaminas) y ambos fenómenos están influenciados por la naturaleza del producto y de las condiciones empleadas en la rehidratación (Lewicki, 1998).

En la rehidratación es importante considerar dos aspectos: la velocidad de rehidratación y la capacidad de rehidratación. La velocidad de rehidratación usualmente decrece con el tiempo de inmersión, este valor es importante para

caracterizar productos que deberán ser sujetos a cortos tiempos de inmersión, como las frutas que se mezclan en los cereales para desayunar. En este caso, una velocidad de rehidratación lenta es requerida, para que el producto permanezca crujiente antes de su consumo. Por otro lado, el grado de rehidratación o capacidad de rehidratación se refiere a la máxima cantidad de agua que un producto es capaz de absorber al momento de la inmersión (Oliveira y Ilicanu, 1999)

Asimismo, las propiedades de la rehidratación son influenciadas por diversos factores, los cuales se agrupan en intrínsecos (geometría del producto, pretratamientos, formulación del producto, técnicas y condiciones del secado, entre otros), y factores extrínsecos como la composición del medio de inmersión, la temperatura y la agitación durante la rehidratación (Ergün *et al.*, 2016).

Los alimentos deshidratados, para ser considerado como óptimos, deben de rehidratarse lo más rápido posible y mostrar las mismas características estructurales y químicas del alimento fresco, así como también sus propiedades nutricionales y sensoriales, para lo cual el aumentar la temperatura de la solución rehidratante sigue siendo el método más utilizado para reducir el tiempo de rehidratación sin incurrir en mayores costos de operación. Dentro de los medios de rehidratación más utilizados en alimentos se encuentran, la inmersión en agua como la más simple, jarabes o soluciones azucaradas (glucosa, sacarosa, trehalosa) , leche, yogur, jugos de frutas y verduras (Marín *et al.*, 2006; Shih *et al.*, 2008).

1.5 Propiedades térmicas de los alimento

El conocimiento de las propiedades termofísicas de los alimentos es requerido para una gran variedad de investigaciones y aplicaciones en ingeniería. Estos parámetros son esenciales para la modelación, la simulación y la optimización de las operaciones de procesamiento de alimentos que envuelven la transferencia de calor, especialmente en lo que concierne a costos de energía, y calidad y seguridad de alimentos (Mercali *et al.*, 2011).

Las propiedades térmicas de los materiales agrícolas son dependientes de la composición química y la temperatura, y debido a la gran variedad de productos alimenticios disponibles es difícil generar una base de datos experimentales de propiedades térmicas para todas las posibles condiciones y composiciones de los alimentos, por lo que la opción más viable es la predicción de las propiedades térmicas de los alimentos usando modelos matemáticos que consideren su composición química (Fricke y Becker, 2001; Noche *et al.*, 2011). Entre estos parámetros se encuentran la conductividad térmica y el calor específico; los cuales son propiedades termofísicas esenciales en el estudio del calentamiento, secado y congelación de alimentos (Jibril *et al.*, 2016).

La conductividad térmica (k), es empleada para estimar la transferencia de calor por conducción al procesar un alimento. En los materiales alimenticios esta propiedad depende fundamentalmente de la composición, la porosidad del material y de factores que afectan las trayectorias de flujo de calor a través del material, como la forma, tamaño y distribución de los poros, el fluido contenido en los poros y la homogeneidad (Serpil y Servet, 2006).

En los alimentos la conductividad térmica varía entre la conductividad del agua ($K_{\text{agua}}=0.614 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a 27°C) y la del aire ($K_{\text{aire}}=0.026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a 27°C), las cuales son el mayor y el menor componente conductor en los alimentos, respectivamente. En el caso del secado la conductividad térmica decrece con la disminución del contenido de agua durante el proceso, esto es debido a la formación de poros los cuales están ocupados por aire (Serpil y Servet, 2006).

En lo que respecta al calor específico (C_p), esta propiedad es necesaria para la estimación de la cantidad de energía requerida por un alimento para elevar su temperatura un grado. El calor específico de los alimentos depende de su composición; principalmente del contenido de agua, ya que es el componente que posee un mayor C_p comparación con los otros componentes de los alimentos. En

diversos estudios se ha establecido que en los procesos de deshidratación el C_p de los alimentos depende de la humedad y la temperatura de secado (Serpil y Servet, 2006; Kaletunç, 2007; Jibril *et al.*, 2016).

1.5 Estudios realizados en ciruelas

El proceso de secado ha sido estudiado por diversos investigadores para numerosas variedades de ciruela, principalmente para las pertenecientes al género *Prunus*, en lo que respecta al género *Spondias* la mayoría de los estudios tienen como objetivo principal es establecer características físicas y fisiológicas durante el desarrollo de la ciruela, establecer sistemas de manejo adecuados para reducir las pérdidas de calidad y cantidad durante la recolección y la post-cosecha.

Entre estos estudios se encuentran los realizados por Sacilik *et al.* (2006) quienes estudiaron las cinéticas de secado de la ciruela variedad Üryani mediante el secado convectivo para evaluar el efecto de la temperatura del aire y de un pretratamiento (inmersión en agua caliente a 80 °C por 2 min) sobre el comportamiento de la ciruela. El empleo de pretratamientos en la fruta es con el fin de disminuir la resistencia que ofrece la cutícula cerosa en la piel de la fruta al secado.

Por su parte Ioannou *et al.* (2011) aplicaron el secado por túnel para deshidratar piezas de ciruelas mirabelle congeladas obteniendo un producto con bajo contenido de humedad y mínima pérdida de compuestos bioactivos. Kim *et al.* (2013) comparó las rodajas de ciruela (*Prunus salicina* L) deshidratadas con dos agentes (extracto de alga roja y maltodextrina) y con secado por aire; sus resultados sugieren que la deshidratación con extracto de alga es una alternativa para la obtención de ciruelas deshidratadas con un alto grado de rehidratación y mínima pérdida de calidad (ácido ascórbico y color). Finalmente, Michalska *et al.* (2016) evaluaron el impacto de diferentes métodos de secado sobre algunos compuestos bioactivos de diferentes variedades de ciruela de la especie *Prunus domestica* L. Los investigadores observaron un mayor índice de pardeamiento en las ciruelas deshidratadas mediante aire caliente; además reportaron que la calidad de los polvos de ciruela obtenidos

mediante secado de microondas al vacío fue similar a la obtenida empleando la liofilización.

En lo que respecta a las investigaciones realizadas sobre *Spondias purpurea*, Vargas-Simón *et al.* (2011) efectuaron un trabajo en tres municipios de Tabasco, México; con el fin de conocer las características morfológicas (porcentaje de porción comestible, floración y fructificación) de variedades de ciruelas (*Spondias purpurea* L.). Alia-Tejacal *et al.* (2012) realizaron estudios de caracterización de algunos rasgos físicos y químicos de la *Spondias purpurea* L. evaluando 67 colectas recabadas de los estados de Chiapas, Guerrero y Morelos, México. En este sentido Maldonado-Astudillo *et al.* (2014) evaluaron la fisiología y tecnología post cosecha de *Spondias purpurea* L y *S. mombin* L. para determinar los cambios que sufre la ciruela post-cosecha, así como las enfermedades y pestes que sufre el fruto.

En cuanto a la conservación de la fruta, Osuna *et al.* (2011) valoraron el efecto del 1-Metilciclopropeno (1-MCP) sobre la vida de anaquel y calidad de la ciruela mexicana fenotipo amarillo (*Spondias purpurea* L.) almacenada en simulaciones de mercadeo (22 ± 2 °C, 70 ± 10 % HR) y en dos estados de madurez (sazón y tres cuartos); los investigadores observaron que el 1-MCP disminuye la respiración en todos los casos y reduce la pérdida de peso en frutos sazones; además retrasa el desarrollo del color externo y permite mantener la firmeza del fruto sin afectar el contenido de sólidos solubles totales. Montalvo-González *et al.* (2011) realizaron un estudio del almacenamiento de ciruela mexicana y el efecto de la luz sobre el producto almacenado; sus resultados demostraron que el almacenamiento de ciruela en recipientes herméticos (sin vacío) y sin luz logra aumentar el tiempo de vida de la ciruela hasta 14 días.

En lo que respecta a los procesos de secado Muy *et al.* (2010), estudiaron las propiedades de la ciruela roja (*Spondias purpurea* L.) en fresco y en producto deshidratado En la primera etapa evaluaron la calidad de la ciruela en cuatro estados de madurez encontrando mayor firmeza y rendimiento (70 %) en la

maduración 1 y 2 en comparación con la madurez 3 y 4 (62 %), la luminosidad, pH y acidez titulable no presentaron variación, pero el contenido de sólidos solubles aumento en el estado 4, por lo cual fueron los frutos seleccionados para deshidratar. En la segunda etapa se deshidrato la fruta pretratada (escaldada por 12 min a 95 °C en agua con 1 % de NaCl) en horno a una temperatura de 65 °C por 12 h, mientras que al sol la muestra se expuso por 72 h. Las variables de calidad fueron similares en las ciruelas deshidratadas en ambas condiciones de secado, en promedio la fruta presento pH de 3.2, acidez de 2.49%, dulzor de 12.3 y una humedad de 17 %.

Todisco *et al.* (2014) estudiaron el almacenamiento de pulpa de ciruela deshidratada mediante secado por aspersion (temperatura de secado de 120 °C y 10% de maltodextrina); para lo cual almacenaron el polvo en bolsas de polietileno y laminadas por 120 días a 25 °C. Los autores reportaron que el empaque laminado provee una barrera más efectiva al vapor de agua, conservando el producto con una humedad y a_w aceptables. En otro estudio efectuado por Guerrero-Beltrán *et al.* (2015) realizaron el estudio de isotermas de sorción de polvos de ciruela mexicana liofilizada (temperatura de congelación de -18 °C, presión de vacío de 10 μ mHg por 24-48 h), obteniendo isotermas del tipo II, las cuales obtuvieron un mejor ajuste cuando se empleó el modelo de Oswin; reportando un contenido de humedad entre 4.17-6.18 g H₂O/ g s.s. para el producto seco. Finalmente, Lins *et al.* (2017) evaluaron las isotermas de sorción de polvo de ciruela (*Spondias purpurea* L) deshidratada en un secador de lecho. Los autores clasificaron las isotermas obtenidas como tipo II y reportaron que el modelo de Peleg obtuvo el mejor ajuste de los datos experimentales, además el producto obtenido presentó alta solubilidad (mayor a 60%) y concentración de compuestos fenólicos.

1.6 Optimización

Los métodos de optimización surgieron en función de la necesidad de mejorar el desempeño de los sistemas que existen habitualmente. De esta manera, podemos definir optimización como un proceso basado en instrucciones que permiten obtener

el mejor resultado de un procedimiento. Científicamente estas instrucciones son frecuentemente expresadas a través de métodos matemáticos que permiten maximizar o minimizar alguna propiedad específica del sistema en estudio (Kuehl, 2001).

La optimización puede ser dividida en etapas que se caracterizan por la definición de la función objetivo (respuesta). Puede haber uno o más criterios a ser observados como son la determinación de los factores (variables) que presentan influencias significativas sobre la respuesta que se desea optimizar, y la optimización propiamente dicha, esto quiere decir, buscar la combinación de los valores de los factores seleccionados que resulten en la mejor respuesta (maximización o minimización).

1.6.1 Metodología de superficie de respuesta

La metodología de superficie de respuesta (MSR) ha demostrado ser una herramienta de gran alcance para determinar los efectos de cada factor y las interacciones entre ellas, lo cual permite realizar la optimización de los procesos de manera eficiente (Sturm *et al.*, 2012). Los procedimientos de superficie de respuesta implican estrategias experimentales, métodos matemáticos y la inferencia estadística, las cuales al combinarse permiten a los usuarios hacer una eficiente exploración empírica de los sistemas en los cuales ellos están interesados. La estrategia experimental permite al analista explorar la superficie de respuesta con la misma precisión, en cualquier dirección.

La metodología de superficie de respuesta es un proceso de tres etapas: (1) la identificación de los factores que tienen un impacto significativo en la variable de respuesta, (2) el desarrollo del modelo, que suele ser un modelo polinomial de segundo orden basado en el diseño central compuesto y (3) la búsqueda de la solución basada en la optimización (maximizar, minimizar) de una respuesta (Pérez-Francisco *et al.*, 2008; Shi *et al.*, 2014)

Diseños de segundo orden

Los diseños de segundo orden son aquellos que permiten estudiar, además de los efectos lineales y de interacción, a los efectos cuadráticos o de curvatura pura. Donde el análisis puede interpretarse como el “ascenso a la loma”, donde la cima representa el punto de la respuesta máxima. Si el óptimo real es un punto de respuesta mínima, se puede pensar en el “descenso hacia un valle” (Montgomery, 2005).

El modelo de segundo orden está dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{Ec. 1.4})$$

donde b_{k0} , b_{ki} , b_{kii} , b_{kij} representan los coeficientes de regresión (linear, interacción y cuadrático), y X_i 's son la variables independientes codificadas (X_1 , X_2 y X_3).

Diseño de composición central

Box y Wilson (1951) propusieron diseños centrales compuestos, que requieren menos combinaciones que los tratamientos 3^k , para estimar las ecuaciones de la superficie de respuesta cuadrática (Kuehl, 2001). Los diseños compuestos centrales son diseños de tratamientos factoriales 2^k con $2k$ combinaciones adicionales, llamados puntos axiales, a lo largo de los ejes coordinados de los niveles de factor codificados. Las coordenadas de los puntos axiales de los ejes del factor codificado son $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$. En general se agregan n_0 replicas al centro del diseño en las coordenadas $(0, 0, \dots, 0)$ (puntos centrales) (Montgomery, 2005; Nath y Chattopadhyay, 2007).

Los diseños centrales compuestos son más económicos en cuanto que permite examinar varios parámetros con un mínimo de recursos experimentales, proporcionan la capacidad de estimar las ecuaciones de respuesta y, determinan los factores más relevantes y su rango de influencia así como las interacciones entre los factores (Baş y Boyaci, 2007; Corzo *et al.*, 2008).

Una variante del diseño compuesto central es el diseño compuesto central en sus caras. En este diseño los puntos estrella o axiales se localizan en los centros de las caras del cubo para $k=3$, como se muestra en la Figura 1.10.

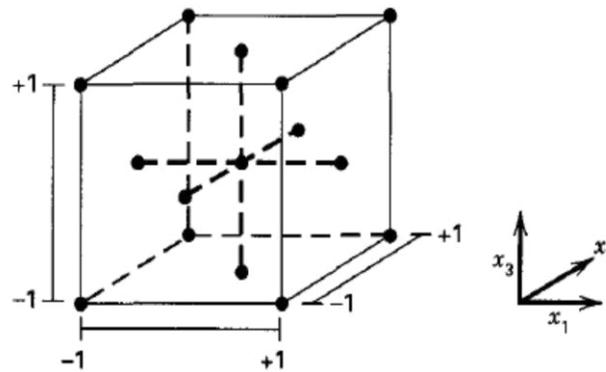


Figura 1.10 Diseño compuesto central centrado en las caras para $k=3$.

Superficies de respuesta y Superposición de contornos

La respuesta se puede representar gráficamente como una superficie, cuando los experimentos investigan el efecto que tiene el variar factores cuantitativos en los valores que toma una variable dependiente o respuesta. La superficie es representada por $\eta = f(x_1, x_2 \dots x_n)$ como una superficie sólida en un espacio tridimensional o una gráfica de contornos (Figura 1.11).

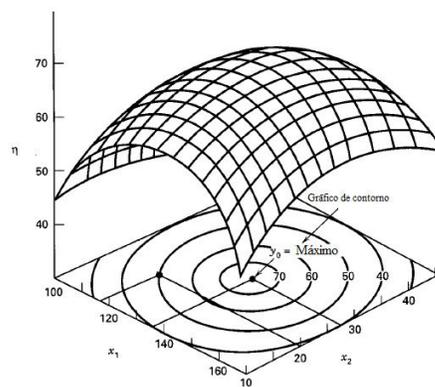


Figura 1.11 Superficie de respuesta tridimensional y gráfico de contornos (rendimiento esperado (η) en función de (x_1) y (x_2)) (Montgomery, 2005).

La gráfica de contornos de la superficie, en la que se trazan las denominadas líneas de contorno, que son curvas correspondientes a valores constantes de la respuesta sobre el plano X_1X_2 (plano cuyos ejes coordenados vienen dados por los niveles X_1 y X_2 de los factores). Geométricamente, cada línea de contorno es una proyección sobre el plano X_1X_2 de una sección de la superficie de respuesta al intersectar con un plano paralelo al X_1X_2 . La gráfica de contornos resulta útil para estudiar los niveles de los factores en los que se da un cambio en la forma o altura de la superficie de respuesta (Montgomery, 2005).

La existencia de gráficas de contorno no está limitada a 3 dimensiones a pesar de que en el caso en que haya más de 3 factores de influencia no es posible la representación geométrica. No obstante, el hecho de poder representar gráficas de contorno para problemas en que haya 2 o 3 factores permite visualizar más fácilmente la situación general.

Las condiciones óptimas de proceso pueden ser determinadas por la región que se deriva de la superposición de las gráficas de contorno de dos variables independientes mientras la otra variable permanece constante (como grafica de contorno). Esta técnica proporciona la región o área de operación para respuestas predeterminadas (Madamba, 2002; Theppaya y Prasertsan, 2004).

1.6.2 Aplicación de la optimización en los procesos de secado

El principal objetivo de la optimización de las condiciones de los procesos térmicos es la maximización de la calidad nutricional y/o sensorial del producto final. La calidad nutricional, como el contenido de vitaminas, es importante en algunos alimentos específicos (ej. alimentos para bebe) y en términos del bienestar público, así como la percepción de los consumidores sobre los atributos físicos (color, textura y sabor) (Sturm *et al.*, 2012). Las condiciones de los procesamientos de secado pueden además ser optimizados en términos de aspectos económicos. El consumo de energía puede ser minimizado o la productividad puede ser maximizada.

Obviamente en estas situaciones, el compromiso principal debe ser alcanzado en términos de la calidad del producto final (Oliveira y Oliveria, 1999).

En los procesos donde se deshidratan alimentos mediante métodos convencionales, la calidad del producto se ve afectada por la geometría del alimento, la temperatura y disposición física del alimento con el aire, y el tiempo de secado (Jangam *et al.*, 2010).

Es por ello que la influencia de estos factores en el secado convectivo de alimentos ha sido estudiada para obtener condiciones óptimas de procesamiento. Pérez-Francisco *et al.* (2008) optimizaron el secado de chayote para minimizar el costo de proceso y obtener un máximo de producción de rodajas de chayote pretratadas en ácido ascórbico. Por su parte Erbay e Icier, (2009) y Sturm *et al.* (2012) aplicaron la MSR para optimizar el tiempo, y la temperatura y velocidad de aire empleados en el secado por charolas de hojas de oliva y coroba, respectivamente. Los autores obtuvieron regiones óptimas para realizar el proceso con una máxima eficiencia energética, así como para obtener productos estables. Así mismo, Gupta *et al.* 2013 emplearon la MSR para predecir el tamaño de muestra, la temperatura y tiempo de secado para obtener coliflor deshidratada con un mínimo pardeamiento, alta rehidratación y retención de ácido ascórbico.

En torno a la liofilización, aunque en este método se obtienen productos de alta calidad, su aplicación se ve limitada debido al alto costo del proceso. Por lo tanto, la calidad del producto, así como el costo y tiempo de procesamiento, deben de ser considerados para llevar a cabo la operación bajo condiciones óptimas. Además, la geometría y congelación del producto son factores importantes para la optimización, ya que reducen el tiempo de liofilización y previenen el colapso del alimento (Shishergarha *et al.*, 2002).

La optimización de estos factores aplicando la MSR han sido estudiado por Hammami y Rene (2002) y Shishegarha, *et al.* (2002) quienes optimizaron las condiciones de la liofilización de fresas con diferentes tamaños de muestra. Bera *et*

al. (2012) optimizaron la liofilización asistida por IR de cilindros de plátano de diferentes diámetros y congelados de manera convencional y criogénica. Del mismo modo, Almeida-Trasvina *et al.* (2014) optimizaron la temperatura, presión y tiempo de procesamiento en la liofilización de puré de manzana como una alternativa para preservar los antioxidantes en el alimento. Finalmente, esta metodología también ha sido empleada con resultados favorables para maximizar la producción y minimizar el consumo de energía en la liofilización de diversos alimentos cárnicos y plantas medicinales (Luo y Zhou *et al.*, 2008; Chakraborty *et al.*, 2011).

CAPÍTULO 2
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

PARTE I

Desarrollo experimental del secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana

Este apartado, básicamente engloba el desarrollo experimental del secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) ecotipo betabel para llevar a cabo la optimización empírica de ambos procesos unitarios. En esta sección se realizaron los análisis fisicoquímicos (actividad de agua, humedad, parámetros de color, contenido de pectina, acidez titulable y vitamina C) y se determinaron las propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico) de la ciruela fresca y deshidratada; así como se realizó un análisis del consumo de energía, producción y costo de las ciruelas deshidratadas mediante el secado por charolas y la liofilización. En la Figura 2.1 se muestra de manera general la metodología que se utilizará para la realización de este trabajo de investigación.

PARTE II

Rehidratación de la ciruela mexicana

Esta etapa corresponde a la evaluación del efecto de las variables del proceso de secado por charolas y liofilización sobre la capacidad de rehidratación de las ciruelas deshidratadas. Para este estudio se consideraron dos medios rehidratantes, agua y leche; así como dos temperaturas de rehidratación 10 y 30 °C. Es importante conocer la capacidad de rehidratación de la ciruela deshidratada, debido a que es una característica de calidad y un indicador del daño que presenta el alimento durante su procesamiento.

PARTE I

2.1 Metodología general

La metodología empleada en este proyecto consiste en cinco etapas principales: selección de la materia prima, acondicionamiento, secado, optimización y validación de los resultados.

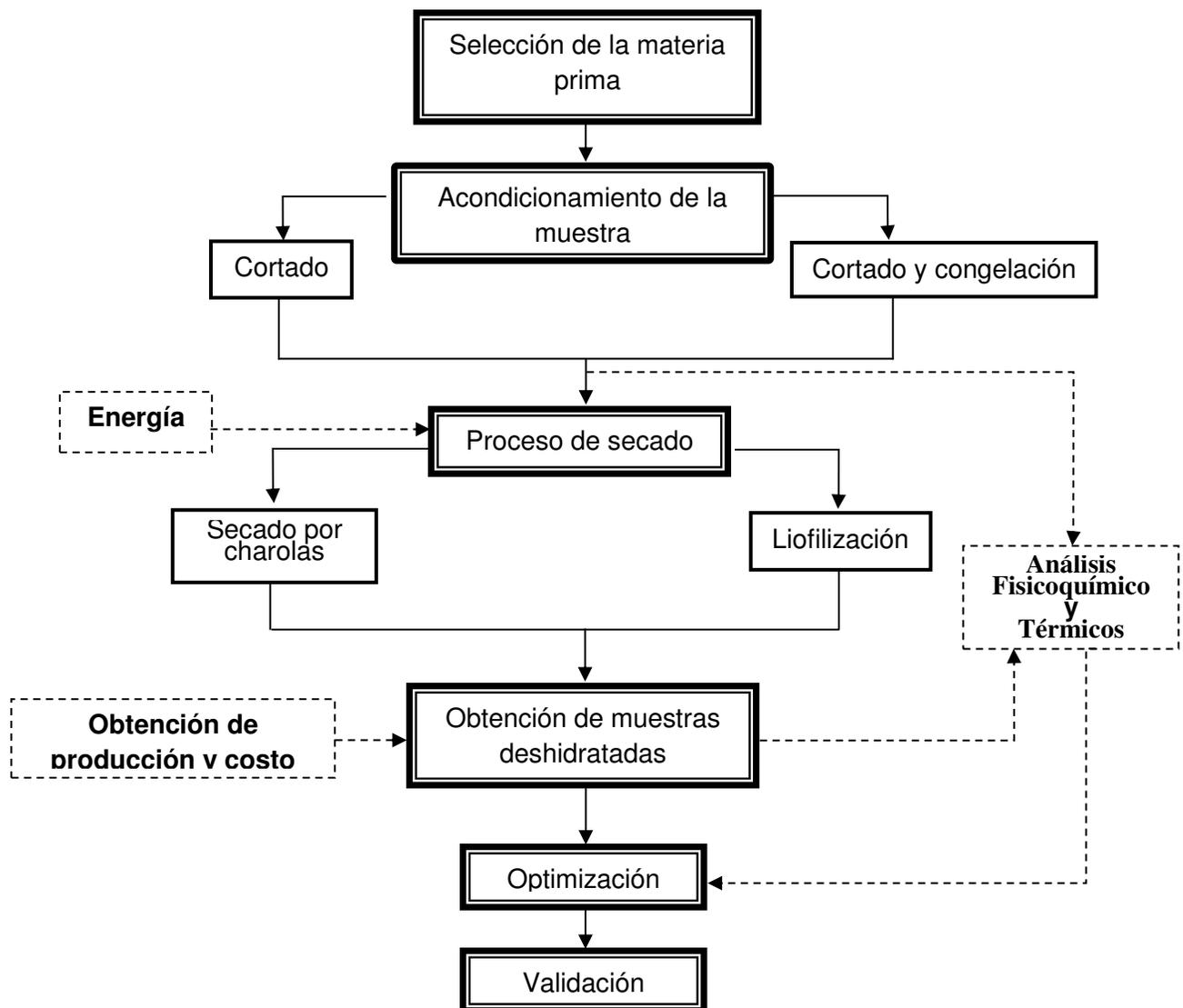


Figura 2.1 Metodología general aplicada para el secado de ciruela.

2.2 Selección y acondicionamiento de la materia prima

Para la realización de este estudio se emplearon frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) ecotipo betabel procedentes del área de producción de Orizaba y Coscomatepec Veracruz, México. La selección de frutos se realizó considerando el estado de madurez (Figura 2.2), de acuerdo al color de cáscara al momento del corte 30% verde-70 % rojo (Muy *et al.*, 2010).



Figura 2.2 Estado de madurez de la ciruela mexicana.

Las ciruelas seleccionadas fueron lavadas y sometidas a un proceso de corte para la obtención de rodajas de 1,2 y 3 cm de diámetro y 0.2 cm de espesor; las rodajas fueron cortadas paralelas al eje axial de la fruta (Figura 2.3).



Figura 2.3 Rodajas de ciruela mexicana: a) 1, b) 2 y c) 3 cm de diámetro.

2.3 Proceso de secado

Para la realización de esta investigación se evaluó un método de secado convectivo empleando un secador por charolas y un método de deshidratación al vacío: la liofilización mediante un liofilizador, en los cuales las rodajas de ciruela fueron deshidratadas a diferentes condiciones de operación.

2.3.1 Secado por charolas de la ciruela mexicana

Se empleó un secador de charolas, en el cual las rodajas de ciruela (1, 2 y 3 cm de diámetro y 0.2 cm de espesor) fueron deshidratadas por medio de aire caliente a una temperatura de 50, 65 y 80°C con diferentes tiempos de operación (4, 6 y 8 h).

Para la realización del secado una vez alcanzada la temperatura de operación deseada (50, 65 y 80 °C), se introdujeron las rodajas de ciruela. Durante el proceso de secado se tomaron muestras cada 15 min durante la primera hora, 30 min durante la siguiente hora, debido a que durante este tiempo se observa la mayor pérdida de humedad del fruto y finalmente cada 60 min hasta el terminó de cada corrida experimental. La finalidad de la toma de muestras de ciruela fue seguir la evolución de algunas variables de respuesta (a_w , X y color), cuyos métodos se describen en la sección 2.4.

2.3.1.1 Descripción del secador por charolas utilizado

Se empleó un secador por charolas a nivel planta piloto SEM-2 Polinox, MX, (Figura 2.4), el cual está constituido en su interior de lámina de acero inoxidable especificación AISI SA-240 T-304 y lámina de acero al carbón especificación AISI SA-36 con acabado en anticorrosivo y pintura esmalte en su exterior. Este se compone de una cámara de secado de acero que está conectada a un calentador eléctrico a 4.5 kW, que se utiliza para calentar el aire a la temperatura de secado deseada, la cual fue controlada electrónicamente con una variación de ± 1 °C. La cámara de secado está compuesta por diez bandejas (0.50 m de ancho y 0.75 m de largo) perforadas a través de las cuales fluye verticalmente el aire de secado. La

velocidad del aire se midió con un anemómetro en la salida del secador, el cual se mantuvo constante a 1 m/s durante el proceso.



Figura 2.4 Secador de charolas SEM-2 Polinox

2.3.1.2 Diseño de experimentos

Para llevar a cabo el estudio del secado por charolas de la ciruela mexicana se aplicó un diseño experimental de cubo centrado en sus caras representado como $2^3+2(3)+1$. En la Tabla 2.1 se muestran los factores y niveles utilizados para cada factor o variable del proceso de secado por charolas

Tabla 2.1 Factores y niveles del proceso de secado por charolas.

Factor	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
Temperatura de secado (°C)	80	65	50
Tiempo de secado (h)	8	6	4
Diámetro de la muestra (cm)	3	2	1

En la tabla 2.2 se muestran los experimentos con las correspondientes condiciones de secado evaluadas. Para la selección de la temperatura de secado se consideraron estudios previos de secado convectivo realizados a diferentes

variedades de ciruela (Sacilik *et al.*, 2006; Ioannou *et al.*, 2011; Muy *et al.*, 2011). Los autores reportan temperaturas de aire de secado entre 50 y 90 °C. Por otro lado, la selección de tamaño y tiempo de secado se hizo considerando estudios previos realizados sobre el secado de rodajas de ciruelas y otros frutos (Goyal *et al.*, 2007; Ilns *et al.*, 2011; Fante *et al.*, 2011; Villegas-Santiago *et al.*, 2011) donde los autores reportan tamaños de muestra entre 0.5 y 4 cm y tiempos de secado entre 2 y 10.5 h

Tabla 2.2 Tratamientos experimentales del secado por charolas de la ciruela mexicana.

Exp	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (h)	Diámetro de la muestra (cm)
1	50	4	1
2	50	8	1
3	80	4	1
4	80	8	1
5	50	4	3
6	50	8	3
7	80	4	3
8	80	8	3
9	65	6	2
10	65	8	2
11	65	4	2
12	80	6	2
13	50	6	2
14	65	6	3
15	65	6	1

2.3.2 Liofilización de ciruela mexicana

Las rodajas de ciruela (1, 2 y 3 cm de diámetro y 0.2 cm de espesor) fueron llevadas previamente a una congelación (-20, -40 y -60 °C) durante 2 h y posteriormente se deshidrataron por medio de una liofilización a una presión de vacío de 0.1 mbar, durante diferentes periodos de tiempo (4, 6 y 8 h).

Durante el proceso de liofilización se tomaron muestras cada hora durante los tiempos establecidos para cada corrida experimental. La finalidad de la toma de

muestras de ciruela fue seguir la evolución de algunas variables de respuesta (a_w , X y color), cuyos métodos se describen en la sección 2.4.

2.3.2.1 Descripción de los equipos empleados durante la liofilización

En la etapa de congelación, las temperaturas de -60, -40 y -20 °C fueron aplicadas para congelar las rodajas de ciruela antes de la liofilización. En el caso de las temperaturas más bajas (-40 y -60 °C) se colocaron las muestras en un ultra congelador vertical (So-Low MOD U85-13, USA) que consta de cinco compartimientos, y un sistema de control de temperatura digital (-85 a -40 °C), el cual muestra la temperatura programada y la actual (Figura 2.5); en el caso de las muestras solidificadas a -20 °C se utilizó la cámara de congelación del liofilizador (LABCONCO equipment Co., KS, USA).



Figura 2.5 Ultracongelador So-Low modelo U85-13.

Para la realización de la liofilización se empleó un liofilizador marca LABCONCO Modelo 742004 (Figura 2.6) el cual consiste en una cámara de secado en acero inoxidable tipo 304 con doce válvulas, 12 L de capacidad del colector, un sistema de

refrigeración que llega a los $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, y un sistema de control de vacío cuyo set-point se encuentra en 0.10 mbar.

Para llevar a cabo la liofilización se fijó dentro del sistema de control manual la presión de vacío a la que se deseaba operar (0.1 mbar) y una vez que el sistema de refrigeración alcanza los $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, se colocaron los matraces de congelación que contenían las muestras de rodajas de ciruelas pre tratadas a través de adaptadores de acero inoxidable los cuales se conectan en los puertos de las válvulas de la cámara de secado y colector.



Figura 2.6 Liofilizador LABCONCO Mod-742004.

2.3.2.2 Diseño de experimentos

Para llevar a cabo el estudio de la liofilización de la ciruela mexicana se aplicó un diseño compuesto central centrado en sus caras representado como $2^3+2(3)+1$. En la Tabla 2.3 se muestran los factores y niveles utilizados para cada factor o variable del proceso de liofilización.

Tabla 2.3 Factores y niveles del proceso de secado por liofilización.

Factor	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
Temperatura de secado (°C)	-20	-40	-60
Tiempo de liofilización (h)	8	6	4
Diámetro de la muestra (cm)	3	2	1

En la Tabla 2.4 se presentan las corridas experimentales correspondientes al diseño compuesto central utilizado en esta investigación. Los factores fueron establecidos a partir de experimentos previos. Además, se consideraron los resultados obtenidos por Shishegarha *et al.* (2002) y Marques *et al.* (2006) quienes evaluaron la liofilización de fresas y frutos tropicales, respectivamente. Los investigadores observaron que el empleo de temperaturas de congelación (-90 a -20 °C), y tiempos máximos de procesamiento de 12 h dan como resultado productos de buena calidad y alto valor nutrimental.

Tabla 2.4 Tratamientos experimentales del proceso de liofilización de ciruela.

Experimento	Temperatura de congelación (°C)	Tiempo de liofilización (h)	Diámetro de la muestra (cm)
1	-60	4	1
2	-60	8	1
3	-20	4	1
4	-20	8	1
5	-60	4	3
6	-60	8	3
7	-20	4	3
8	-20	8	3
9	-40	6	2
10	-40	8	2
11	-40	4	2
12	-20	6	2
13	-60	6	2
14	-40	6	3
15	-40	6	1

2.4 Análisis fisicoquímicos de la ciruela

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas (actividad de agua, humedad, y parámetros de color: **L**, **a**, **b** y ΔE), contenido de pectina, ácido cítrico, ácido ascórbico y capacidad de rehidratación de muestras de ciruela betabel fresca (estándar) y deshidratada. Las propiedades fisicoquímicas se determinaron a diferentes tiempos de secado (sección 2.3.1 y 2.3.2) para evaluar la evolución de las cinéticas de estas propiedades en cada uno de las diferentes experimentos realizados.

2.4.1 Actividad de agua

La determinación de la actividad de agua (a_w) de la ciruela durante el periodo de secado por charolas y liofilización, se realizó a través de un medidor de actividad de agua marca AquaLab serie 3 modelo TE. La medición se realizó a una temperatura de 25 ± 1 °C.

2.4.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad del ciruela mexicana se determinó utilizando una termobalanza de halógeno marca OHAUS, modelo MB35. La determinación de humedad se llevó a cabo colocando 1 g de muestra en el platillo dentro de la cámara de secado, distribuyendo homogéneamente la muestra, a una temperatura de 65 °C y seleccionando el tiempo de secado en forma automática.

2.4.3 Análisis de color

Las propiedades ópticas de la ciruela fresca y liofilizada se analizaron empleando un colorímetro HunterLab (MiniScan XE plus; Hunter Lab, VA, USA). El instrumento fue calibrado utilizando patrones de calibración estándar blanco y negro. Se utilizó la escala de Hunter para medir los parámetros **L** (luminosidad) y cromaticidad **a** (verde-rojo) y **b** (azul-amarillo). Con base en estos parámetros se calculó la diferencia total de color (ΔE) que es un resumen matemático de los tres valores **L**, **a** y **b** (Ecuación

2.1), el cual indica la composición de la diferencia total de color de la muestra al final del proceso de secado comparada con la muestra fresca (estándar).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (\text{Ec .2.1})$$

donde

$$\Delta L = L_{final} - L_{inicial}$$

$$\Delta a = a_{final} - a_{inicial}$$

$$\Delta b = b_{final} - b_{inicial}$$

2.4.4 Determinación de pectina

El análisis del contenido de pectina de las rodajas de ciruela fue realizada de acuerdo al método descrito por Kliemann *et al.* (2009) con algunas modificaciones. Una muestra molida en mortero (5 ± 0.01 g) fue sujeta a extracción, adicionando 100 mL de agua destilada. El pH fue ajustado a 2.5 por la adición de ácido cítrico. Esta dispersión fue calentada a 90 °C con agitación continua por 1 h. El extracto caliente fue filtrado en lienzo. El filtrado fue coagulado usando un volumen igual de etanol dejándose reposar durante 2 h; la pectina coagulada fue separada por filtración. El material resultante fue secado en horno hasta obtener peso constante.

El rendimiento de la pectina fue calculado empleando la ecuación (Kliemann *et al.*, 2009):

$$y_{pec}(\%) = 100 \left(\frac{P}{B_i} \right) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde y_{pec} es rendimiento del extracto de pectina en %, P es la cantidad de extracto de pectina en g y B_i es la cantidad inicial de la muestra.

2.4.5 Acidez titulable (ácido cítrico)

El contenido de ácido cítrico se realizó mediante la cuantificación de la acidez titulable empleando el método de la AOAC 942.15 (AOAC, 2000). Las muestras de ciruela (5 g) fueron pesadas en un matraz al cual se adicionaron 50 mL de agua destilada (20 °C). La muestra fueron homogeneizadas por 30 segundos y se valoraron con NaOH 0.1N hasta un pH de 8.1. La cantidad de ácido cítrico presente en las muestras se calculó con la ecuación 2.3.

$$\% Ac (g/100 g) = \frac{N \times V \times Eq \text{ wt}}{W \times 1000} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde N es la normalidad de NaOH (mg/ mEq), V es el volumen de NaOH empleado, Eq wt es el peso equivalente del ácido cítrico, w es la masa de la muestra y la acidez titulable es expresada como % de ácido cítrico (g 100g⁻¹).

2.4.6 Contenido de ácido ascórbico (Vitamina C)

El análisis del contenido de ácido ascórbico (Vitamina C) de las rodajas de ciruela fue realizada de acuerdo al método descrito por Medina-Meza y Barbosa-Cánovas (2015) con algunas modificaciones. Aproximadamente 10 g de muestra de ciruela y 25 mL de ácido metafosfórico al 10% fueron colocados en un mortero. La muestra fue macerada durante 10 min y filtrada. El extracto obtenido se colocó en un matraz de 100 mL y fue aforado con agua destilada.

Para la valoración se empleó yodo 0.01 N, y almidón (1%). De la solución extractora se tomó una alícuota de 10 mL y se agregaron 10 gotas de almidón al 1 %, se valoró la muestra con yodo hasta obtener un color azul. La cantidad de ácido ascórbico presente en las muestras se calculó con la ecuación 2.4.

$$Aa(\text{mg}/100\text{ g}) = \frac{a \times T \times V_{\text{total}}}{V_{\text{filtrado}} \times m} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde Aa es el contenido de Vitamina C (mg/100 g), a es el volumen de I_2 gastados (mL), T es el título del reactivo (0.8806 mg), V_{total} es el volumen de la solución extractora, V_{filtrado} es la alícuota de la solución filtrada (mL) y m es la masa de la muestra (g).

2.5 Análisis térmico de la ciruela

Los modelos empíricos son ampliamente empleados para la predicción de la conductividad térmica (k) y el calor específico (Cp). Las propiedades térmicas de la ciruela deshidratada mediante el secado por charolas y la liofilización fueron calculadas a diferentes tiempos de procesamiento, con el propósito de evaluar la evolución de las cinéticas de dichas variables de respuesta., ya que los alimentos deshidratados estas propiedades varían en función al contenido de humedad.

2.5.1 Determinación de la conductividad térmica de la ciruela

Los modelos de predicción de conductividad térmica (k) en alimentos basados en la composición del alimento son de gran interés; por lo cual, la conductividad térmica se calculó mediante la ecuación empírica (Ecuación 2.5) desarrollada por Sweat especialmente para alimentos sólidos y líquidos (Singh y Heldman, 2009).

$$k = 0.25m_c + 0.155m_p + 0.16m_f + 0.135m_a + 0.58m_m \quad (\text{Ec. 2.5})$$

En la que m es la fracción peso y los subíndices c , p , f , a y m , se refieren, respectivamente, a hidratos de carbono, proteína, grasas, cenizas y humedad. La conductividad térmica se expresa normalmente en $W/m^{\circ}C$; otras unidades equivalentes son $W/m \cdot K$ y $J/m \cdot K$.

2.5.2 Determinación del calor específico de la ciruela

El calor específico (C_p) de los alimentos es dependiente de su composición, principalmente de su el contenido de agua. Heldman (1975) propuso la siguiente ecuación para estimar el calor específico en los productos alimenticios empleando la fracción masa de sus constituyentes.

$$C_p = 1.424m_c + 1.549m_p + 1.675m_f + 0.837m_a + 4.187m_m \quad (\text{Ec. 2.6})$$

En la que m es la fracción peso y los subíndices c , p , f , a y m , se refieren, respectivamente, a hidratos de carbono, proteína, grasas, cenizas y humedad. Las unidades de calor específico son reportadas $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$; y $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, (Singh y Heldman, 2009).

2.6 Medición de la energía durante el proceso de secado por charolas

Durante el proceso de secado, se evaluará el consumo de energía, esto se realizará mediante la medición de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en la entrada y salida del aire del secador. Con la ayuda de la carta psicométrica y estas temperaturas se calcularán las entalpías del proceso de secado de la ciruela.

Mediante la ecuación 2.9 (Pérez-Francisco, 2008) se determinará la energía consumida durante el proceso de secado.

$$Q = \frac{F_v}{v} * (H_s - H_e) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde Q es la energía requerida por el proceso de secado (KW), ΔH es la diferencia de entalpia del aire de secado, F_v es el flujo volumétrico del aire de secado, v es el volumen específico del aires de secado, H_s es la entalpia del aire de secado y H_e es la entalpía de salida del aire de secado.

2.7 Medición de la energía durante el proceso de liofilización

La evaluación del consumo de energía durante la liofilización puede ser realizada enfocándose en las diferentes etapas de la liofilización. En este estudio se realizó la evaluación energética de las tres principales fases de la liofilización (Pardo y Leiva, 2010):

Enfriamiento y congelación

$$E_1 = m_1 C_p (T_1 - T_2) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$E_2 = m_2 \lambda_1 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde E_1 es la energía de enfriamiento (kJ), m_1 es la masa total de la fruta (kg), C_p es el calor específico de la fruta (kJ/Kg°C), T_1 es la temperatura ambiente (°C), T_2 temperatura de congelación, E_2 es la energía de congelación, m_2 es la masa de la fruta congelada (kg), λ_1 es el calor latente de congelación del agua (kJ/kg).

Sublimación

$$E_3 = m_2 \lambda_2 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$E_4 = m_3 C_p (T_3 - T_2) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$E_5 = m_4 \lambda_3 \quad (\text{Ec.2.12})$$

donde E_3 es la energía de sublimación (kJ), λ_2 es el calor latente de sublimación (kJ/kg), E_4 es el calor latente sensible durante el calentamiento de la muestra seca, m_3 es la masa de la fruta seca (kg), T_3 es la temperatura de calentamiento (°C), E_5 es el calor latente de vaporización del agua no congelable, m_4 es la masa de vapor (kg) y λ_3 es el calor latente de vaporización (kJ/kg).

Condensación

$$E_6 = m_2 \lambda_4 \quad (\text{Ec.2.13})$$

$$E_7 = m_6 \lambda_5 \quad (\text{Ec.2.14})$$

donde E_6 es la energía de condensación (vapor-sólido) (kJ), m_4 es la masa de vapor (kg), λ_4 es el calor latente de condensación (kJ/kg), E_7 es el calor latente de condensación del agua evaporada (vapor-sólido), m_6 es la masa de vapor (kg), λ_5 es calor latente de condensación (kJ/kg),

Adicionalmente, se calculó el consumo de la bomba de vacío.

$$E_8 = (P - P_{fc})Vt(t)/tfv \quad (\text{Ec. 2.15})$$

donde E_8 es el consumo de la bomba de vacío, p_{fc} es la presión en la cámara durante la liofilización (Pa), Vt es el volumen total de aire en el liofilizador (m^3), t es el tiempo de liofilización, tfv : es el tiempo de trabajo de la bomba vacío.

2.8 Evaluación de la producción y del costo del proceso de secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana

La producción se determinó a partir de datos iniciales (humedad) de la ciruela mexicana (ecotipo betabel), así como el contenido de humedad de la ciruela deshidratada mediante el proceso de charolas y liofilización. Se realizó un balance de masa mediante el cual se calculó el contenido de producto seco en gramos a la salida; partiendo de este dato y conociendo el peso de la carga alimentada al secador se determinó la cantidad de gramos teóricos a la salida. La producción de la ciruela deshidratada (kg/h) en ambos procesos se calculó mediante la ecuación 2.16

$$P = G_{\beta_0}(1 + X_{\beta}) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde G_{β_0} es la alimentación inicial de la muestra (Kg/h) y X_{β} es el contenido de agua (kg agua / kg de sólido seco) a un tiempo dado.

El costo del proceso de secado (secado por charolas y liofilización) se considera como la suma del costo de la energía consumida durante el proceso de secado y el costo de la materia prima (ciruela mexicana, ecotipo betabel); por lo tanto, el costo total está dado por la ecuación 2.17

$$C_T = C_E + C_{MP} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde C_T es el costo total (\$ Kg⁻¹ de producto seco), C_E es el costo de la energía requerida (\$ h⁻¹) y C_{MP} es el costo de la materia prima (\$ h⁻¹)

2.9 Optimización del proceso de secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana

La optimización del proceso de secado por charolas y liofilización de ciruela *Spondias purpurea* L. se llevó a cabo mediante la técnica de superficie de respuesta empleando un diseño experimental de cubo de caras centradas 2³+2(3)+1. Para cada respuesta (a_w , X , ΔE , producción y costo) fueron obtenidos los modelos polinomiales de segundo orden (Ecuación 2.18) empleando el software estadístico Minitab Realase versión 10. Además, a partir de los modelos obtenidos para cada respuesta se generaron los gráficos de superficie de respuesta y de contornos.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Las condiciones óptimas para ambos métodos de secado se obtuvieron mediante la superposición de los gráficos de contornos, encontrando la región factible para cada variable dependiente, en función de dos variables independientes mientras que la otra variable independiente se mantiene constante.

Mediante el software antes mencionado, se localizaron los puntos óptimos de operación para el proceso de secado por charolas y liofilización de ciruela mexicana que cumplieron con las restricciones descritas a continuación:

$$\begin{aligned} \min a_w &= f a_w(x_1, x_2, x_3) \\ \min X &= f X(x_1, x_2, x_3) \\ \min \Delta E &= f \Delta E(x_1, x_2, x_3) \\ \max \text{Producción} &= f P(x_1, x_2, x_3) \\ \min \text{Costo} &= f C_T(x_1, x_2, x_3) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Sujeto a,

$$-1 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1 \quad (\text{Ec. 2.20})$$

$$X = fX(x_1, x_2, x_3) \leq 0.10 \quad (\text{Ec. 2.21})$$

$$a_w = fX(x_1, x_2, x_3) \leq 0.6 \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Estas restricciones (Ecuación 2.20, 2.21 y 2.22) fueron consideradas, debido a que el valor de las variables involucradas deben de estar entre los valores de -1 y 1 (valores codificados de los reales); además en caso de la humedad y la actividad de agua, para que un producto deshidratado se considere estable, el contenido final de humedad y actividad de agua de dicho producto debe ser menor o igual a 0.10 g H₂O/g s.s. y 0.6 (Ioannou *et al.*, 2011), respectivamente.

2.10 Validación de los puntos óptimos

Para validar los puntos óptimos de las variables del proceso de secado de la ciruela mexicana, se realizó el secado por charolas y la liofilización de la ciruela a las condiciones óptimas siguiendo la metodología para las corridas experimentales. Ambos procesos se realizaron por duplicado, con el fin de obtener el porcentaje de error relativo entre el valor experimental y le predicho por el modelo para cada una de las variables de respuesta con la siguiente ecuación (Luna-Solano *et al.*, 2005):

$$E_R = |(V_{pred} - V_{exp})/V_{exp} \times 100| \quad (\text{Ec. 2.23})$$

donde E_R es el error relativo, V_{pred} es el valor predicho y V_{exp} e el valor experimental.

PARTE II

2.11 Rehidratación

Aproximadamente 0.5-0.6 g de producto deshidratado y liofilizado se sumergieron en 150 mL de dos líquidos rehidratantes (agua destilada y leche) a dos diferentes temperaturas (10 y 30 °C). Las muestras fueron retiradas a los 2, 4, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60 min (Reyes *et al.*, 2008), registrando su peso después de ser drenadas en papel absorbente para eliminar el líquido de la superficie.

La capacidad de rehidratación fue calculada como la cantidad máxima de agua absorbida (g) por g de material seco para cada experimento a los diferentes tiempos de rehidratación (Doymaz, 2007).

CAPÍTULO 3
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parte I

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PARTE I Desarrollo experimental del secado por charolas y liofilización de la ciruela mexicana

3.1 Caracterización fisicoquímica de la ciruela mexicana

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se utilizó ciruela mexicana ecotipo betabel cultivada en las regiones de Orizaba y Coscomatepec del estado de Veracruz, la cual fue seleccionada y acondicionada de acuerdo a lo establecido en el capítulo 2. La Tabla 3.1 muestra los resultados de la caracterización del fruto fresco.

Tabla 3.1 Caracterización de la ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.).

a_w	0.997
pH	4.02
Pectinas (% b.h.)	0.73
Pectinas (% b.s.)	3.92
Proteínas (%)	0.70
Cenizas (%)	0.70
Grasas (%)	0.26
AT (% Ácido cítrico)	1.76
Ac Ascórbico (mg/100 g)	19.75
X (g H₂O/g s.s.)	0.7808
C_p (kJ/kg°C)	3.5610
k (W/m °C)	0.5029
Color	
L	16.24
a	16.69
b	4.97

La ciruela ecotipo betabel mostró una actividad de agua superior a 0.95, lo cual nos indica que la fracción de agua presente puede ocasionar que el crecimiento de microorganismos sea alto y esto propicie que se lleven a cabo reacciones que afecten la estabilidad del alimento. La medición de las propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico) de la ciruela mexicana, no fue encontrada en la literatura; sin embargo, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango

reportado para otras drupas y sus derivados (Gabas *et al.*, 2005; Phomkong *et al.*, 2006; Mercali *et al.*, 2011).

El contenido de pectina se encuentra dentro de los rangos reportados para la ciruela *Spondias purpurea* (0.72) para frutos maduros. La ciruela betabel presenta un pH alto de 4.2 (Alia-Tejacal *et al.*, 2012). El contenido de ácido cítrico en la ciruela betabel se encuentra entre los rangos reportados para *S. purpurea* (0.2 – 2.0 %) producidas en las diferentes regiones de México (Maldonado-Astudillo *et al.*, 2014); del mismo modo el contenido de vitamina C se encuentra dentro del rango reportado para ciruelas y frutos tropicales (Almeida *et al.*, 2011; Maldonado-Astudillo *et al.*, 2014). Adicionalmente, se evaluaron los parámetros de color del fruto fresco, los cuales indican que los frutos tienen una baja luminosidad (**L**), y la cromaticidad (**a** y **b**) indican que la ciruela es un fruto de color rojo-amarillento.

3.2 Secado por charolas de ciruela mexicana

Durante el proceso de secado por charolas de ciruela mexicana betabel, se determinaron como variables de respuesta: la actividad de agua, humedad, color, contenido de pectina, ácido cítrico y ácido ascórbico; los cuales sirvieron como parámetros para indicar la calidad de la ciruela deshidratada y de igual forma para determinar las propiedades térmicas del fruto.

3.2.1 Curvas de actividad de agua de la ciruela durante el proceso de secado por charolas

La actividad de agua (a_w) es un factor importante que afecta la estabilidad de los productos secos, ya que las alteraciones fisicoquímicas y microbiológicas que pueden ocurrir durante el almacenamiento y procesamiento del producto dependen de esta. La figura 3.1 provee información sobre las curvas de actividad de agua para las muestras de ciruela mexicana deshidratadas mediante el secado por charolas. Estas figuras contienen los resultados experimentales de la ciruela betabel con una

a_w inicial de 0.9970. El proceso de secado es caracterizado por un progresivo decremento del contenido de a_w contra el tiempo; el análisis estadístico con prueba de Dunnett ($\alpha=0.05$) indicó que la actividad de agua disminuyó significativamente durante las diferentes condiciones estudiadas.

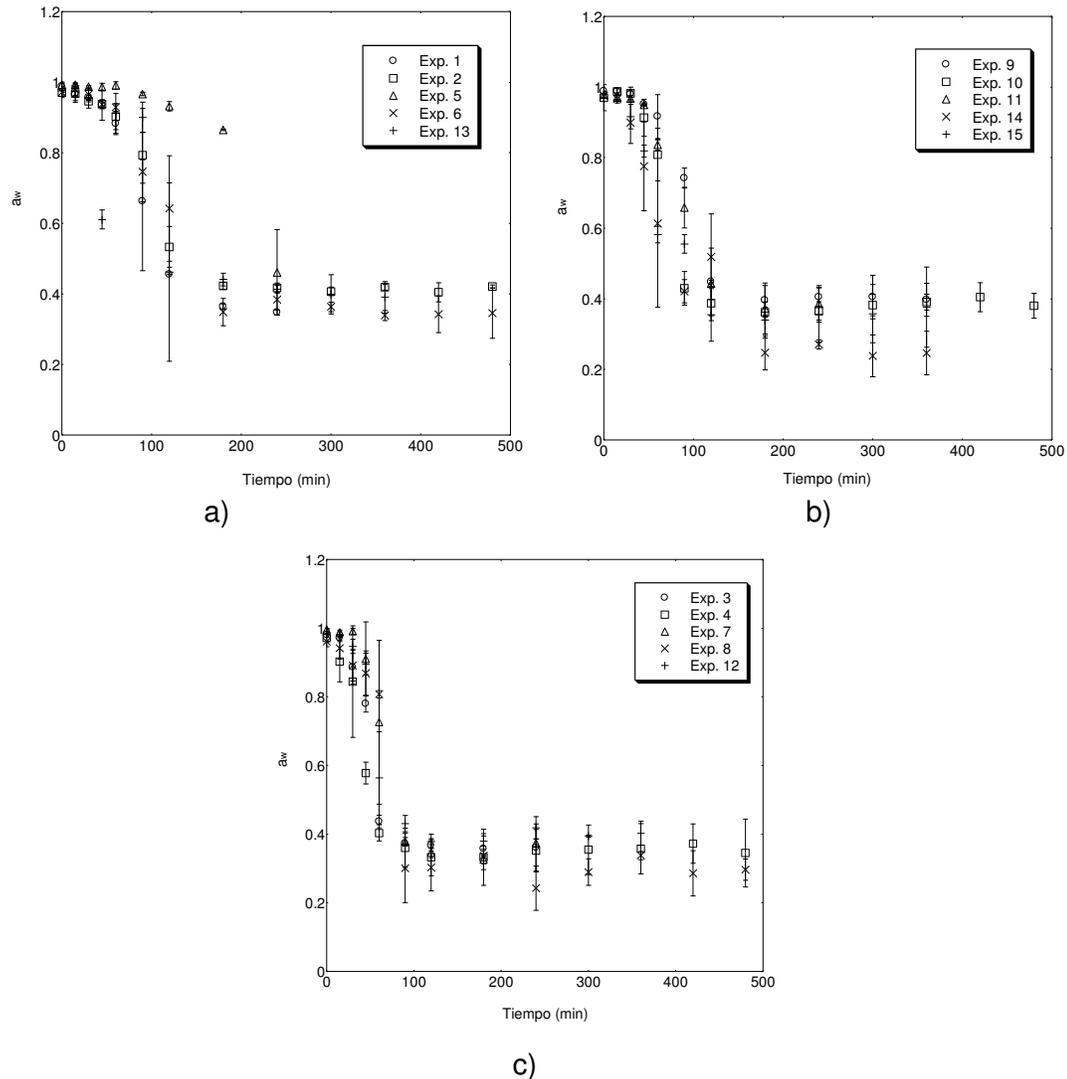


Figura 3.1 Evolución de la a_w de la ciruela durante el proceso de secado por charolas:
a) 50°C, b) 65 °C y c) 80 °C.

Para las diferentes temperaturas se observó que existe un periodo inicial donde el a_w no cambia, el cual es mayor cuando se emplea la menor temperatura de secado (50 °C). En las curvas de a_w de ciruela betabel deshidratadas a una temperatura de 50

°C se observó que este periodo inicial fue mayor (240 min) para los experimentos donde se empleó el diámetro de rodaja mayor (Exp 5 y 6), en comparación con las rodajas de diámetro menor, en los cuales este periodo fue de 90 min.

Con respecto a la evolución de la a_w de las rodajas deshidratadas a una temperatura de 65 °C, este periodo abarcó los primeros 60 min de procesamiento para los diferentes diámetros de ciruela evaluados; mientras que para las rodajas deshidratadas a 80 °C se observó que la a_w comenzó a disminuir después de 30 min para las rodajas de menor tamaño (Exp 3 y 4), y en el caso de las rodajas de diámetro mayor (3 cm) la a_w empezó a disminuir a partir de los 60 min de procesamiento. Después de este periodo la a_w decrece rápidamente, lo cual indica que grandes cantidades de agua libre son removidas durante este periodo. Finalmente, el a_w decrece lentamente hasta ser constante. Observaciones similares fueron reportadas para el estudio del secado de granada y mango (Bchir *et al.*, 2012; Villegas-Santiago *et al.*, 2011), donde la a_w decrece rápidamente cuando se aplican temperaturas altas de procesamiento.

Para los diferentes diámetros de ciruela deshidratada (1, 2 y 3 cm) la a_w tiende a estabilizarse a partir de los 240 y 120 min para las temperaturas de secado de 50 y 65 °C, respectivamente. Por lo que se refiere a la temperatura de 80 °C esta estabilización se presenta a partir de los 60 min para las rodajas de 1 y 2 cm de diámetro y 90 min para las rodajas de 3 cm de diámetro.

3.2.2 Curvas de evolución de humedad de la ciruela durante el proceso de secado por charolas

El contenido inicial de humedad de las rodajas de ciruela betabel utilizadas en el proceso de secado por charolas fue de 0.7808 g H₂O/g s.s. Las curvas de la evolución de la humedad de la ciruela mexicana para las diferentes condiciones de operación se presentan en la Figura 3.2.

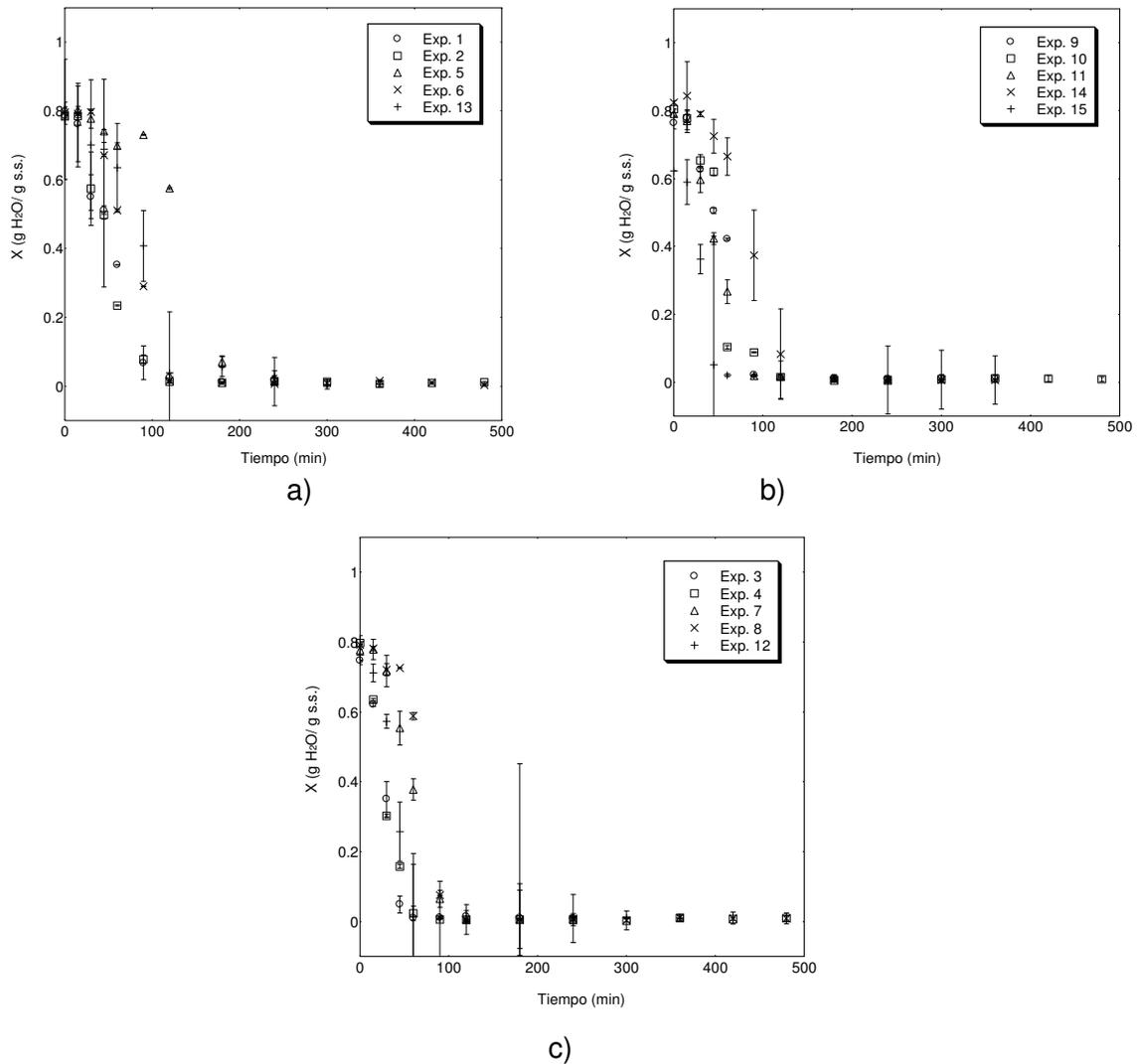


Figura 3.2 Evolución de la humedad de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

Es evidente que el contenido de humedad de las muestras decrece continuamente durante el tiempo de secado. Ihns *et al.* (2011) y Doymaz (2013) mencionan que la velocidad de secado incrementa con el incremento de la temperatura esto debido al decremento de la resistencia externa y a la gran transferencia de agua durante el secado. A una temperatura de 80 °C la mayor pérdida de humedad se da a partir de los 15 min (prueba de Dunnett $\alpha=0.05$), mientras que para una temperatura de 65 y 50 °C la pérdida significativa de la humedad se presentó a partir de los 30 min y 60 min, respectivamente. Un comportamiento similar se reportó en la deshidratación de

rodajas de ciruela (*Prunus domestica*) variedad Suttlej (Goyal *et al.*, 2007), rodajas de tomate (Arslan y Özcan, 2011) y rodajas de durazno (Ihns *et al.*, 2011) donde la mayor temperatura de aire de secado empleada tiene un mayor efecto sobre la humedad dando lugar a una disminución del tiempo de secado

Como previamente se mencionó la velocidad de secado fue alta al inicio del proceso de secado y esta decreció gradualmente hasta el final del proceso. Lo anterior puede ser atribuido a una mayor absorción de energía por el agua superficial del alimento, obteniéndose un secado rápido y la formación de una capa seca en la superficie del producto, cuando el calor penetra a través de esta capa decrece y de este modo retarda la velocidad de secado (Arslan y Özcan, 2011).

El tiempo requerido para que el contenido de humedad sea menor de 0.2 gH₂O/g s.s. fue mayor cuando se empleó una temperatura de aire de secado de 50 °C. Las curvas de secado de las rodajas de ciruela indican que a temperaturas de 65 y 80 °C las muestras alcanzan la humedad de equilibrio con valores menores a 0.20 (g H₂O/g s.s.) en un tiempo aproximado de 90 y 45 min, respectivamente. Cuando se empleó la temperatura de aire de secado de 50 °C las muestras alcanzaron un valor de humedad menor de 0.20 (g H₂O/g s.s.) a partir de los 120 min y para la muestra de mayor tamaño a partir de los 180 min de procesamiento (Exp. 5).

Así mismo, al emplear el tamaño de diámetro de muestra mayor (3 cm) un comportamiento semejante fue observado en relación con el tiempo de secado y la temperatura, observándose que el tiempo de secado a la temperatura de aire menor (50 °C) fue aproximadamente el doble que la de 80 °C. Estas observaciones son similares a los resultados reportados sobre el efecto del tamaño de la muestra en el proceso de secado de diversos productos agrícolas, donde los autores han reportado que la disminución del tamaño de la muestra aumenta la velocidad del secado (Erenturk *et al.*, 2005; Rajkumar *et al.*, 2007; Tripathy y Kumar, 2009; Aktas *et al.*, 2013).

3.2.3 Color de la ciruela durante el proceso de secado por charolas

En el presente estudio los cambios de los parámetros de color fueron evaluados. El color de las rodajas de ciruela fue estimado mediante los parámetros de color **L**, **a**, **b** y en el caso de ΔE este fue calculado como medida de la diferencia de color durante el procesamiento. Los valores de **L**, **a** y **b** para la ciruela betabel fueron: 16.24, 16.69 y 4.97, respectivamente. Es importante recordar que para mejor interpretación de los resultados que **L** (blanco-negro) representa la luminosidad del producto, mientras que **a** (verde-rojo) y **b** (amarillo-azul) representan la cromaticidad del mismo.

3.2.3.1 Parámetro de color L

El parámetro de color **L** de las rodajas de ciruela deshidratadas mediante el secado por charolas fue evaluado mediante un análisis estadístico para determinar la relación del tratamiento térmico con las mediciones experimentales obtenidas.

De manera general, se observó una ligera variación de **L** durante los primeros minutos de secado para las diferentes condiciones de operación empleadas, la cual fue encontrada significativa (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$) cuando se emplearon los diámetros de muestra menores (1 y 2 cm) para todas las temperaturas de secado empleadas. Esta variación del parámetro **L** en la fase inicial de secado (Figura 3.3) se debe a la migración del agua a la superficie del alimento variando su reflectancia (Özkan *et al.*, 2003; Aktas *et al.*, 2013). Barreiro y Sandoval (2006) menciona que este comportamiento se debe posiblemente a la presencia de reacciones sensibles al calor en la primera fase de la curva lo cual implica la degradación de los pigmentos termolábiles, lo que a su vez da lugar a la formación de compuestos oscuros que reducen la luminosidad, mientras que en la segunda fase se involucran pigmentos termoestables. Sin embargo, en las etapas finales del secado se observó que la luminosidad alcanza valores similares al materia fresco, ya que el agua es remplazada por aire en los poros del material y estos adquieren una apariencia pálida (Lewicki, 2004).

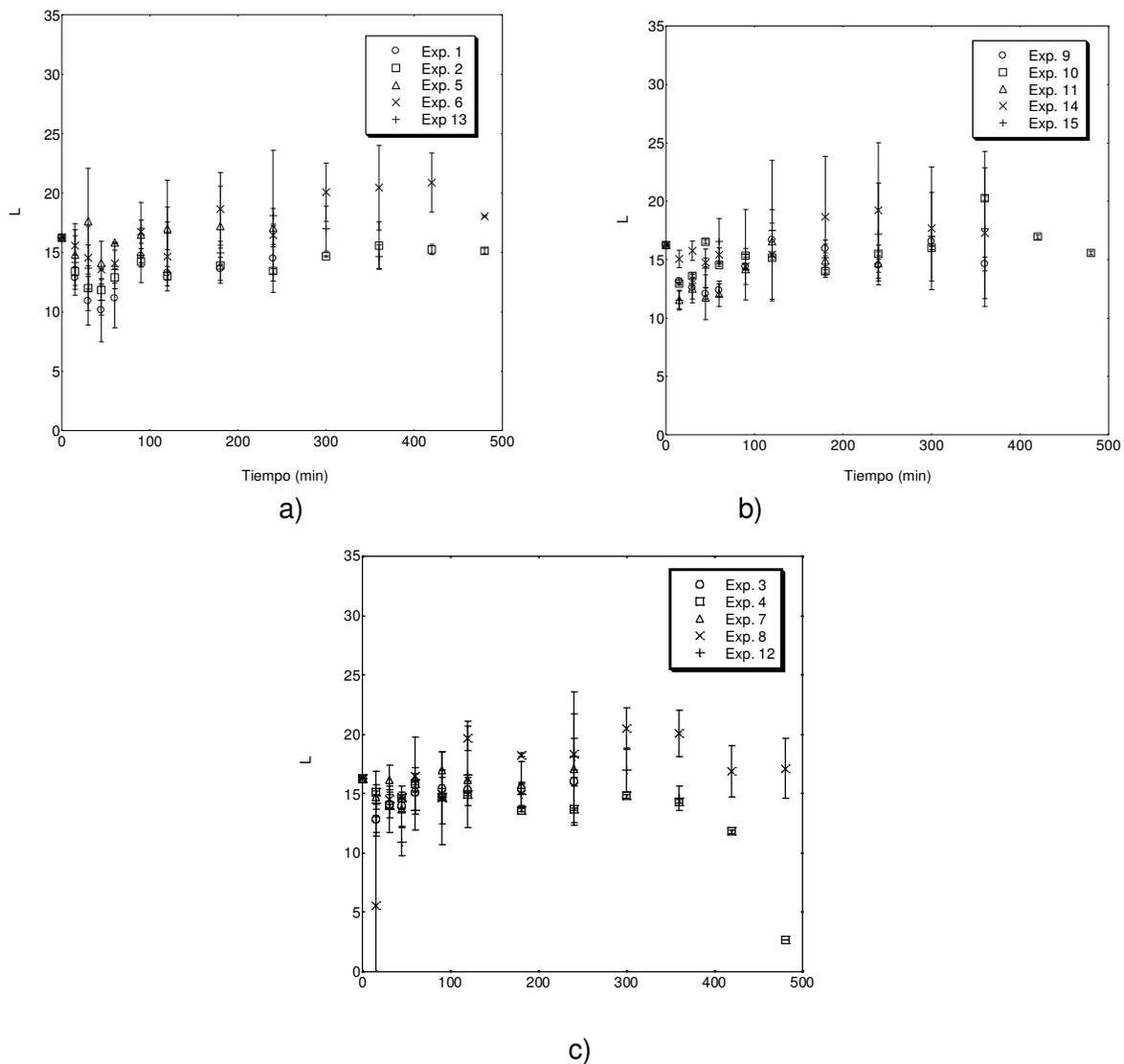


Figura 3.3 Evolución del color (parámetro L) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

En el caso donde se deshidrataron rodajas de 1 cm empleando una temperatura de secado de 80 °C y un tiempo de secado de 8 h (Exp 4), el análisis estadístico indicó diferencias significativas durante todo el proceso; lo anterior debido a que se tiene una mayor superficie de contacto de la muestra y los cambios en la luminosidad pueden corresponder a la gran cantidad de agua removida, encogimiento, inestabilidad de los pigmentos en la muestra o pardeamiento a altas temperaturas de secado (Lewicki y Duszczuk, 1998; Marquez *et al.*, 2013; Asokapandian *et al.*, 2016).

3.2.3.2 Parámetro de color a

El color dominante en la pulpa de la ciruela mexicana ecotipo betabel es rojo y dentro del espacio de color de Hunter se encuentra representado por el parámetro **a**, el cual describe la degradación de la ciruela durante el procesamiento térmico (Ahmed *et al.*, 2004). La figura 3.4 muestra la evolución del color en términos del parámetro **a** de las rodajas deshidratadas mediante secado por charolas.

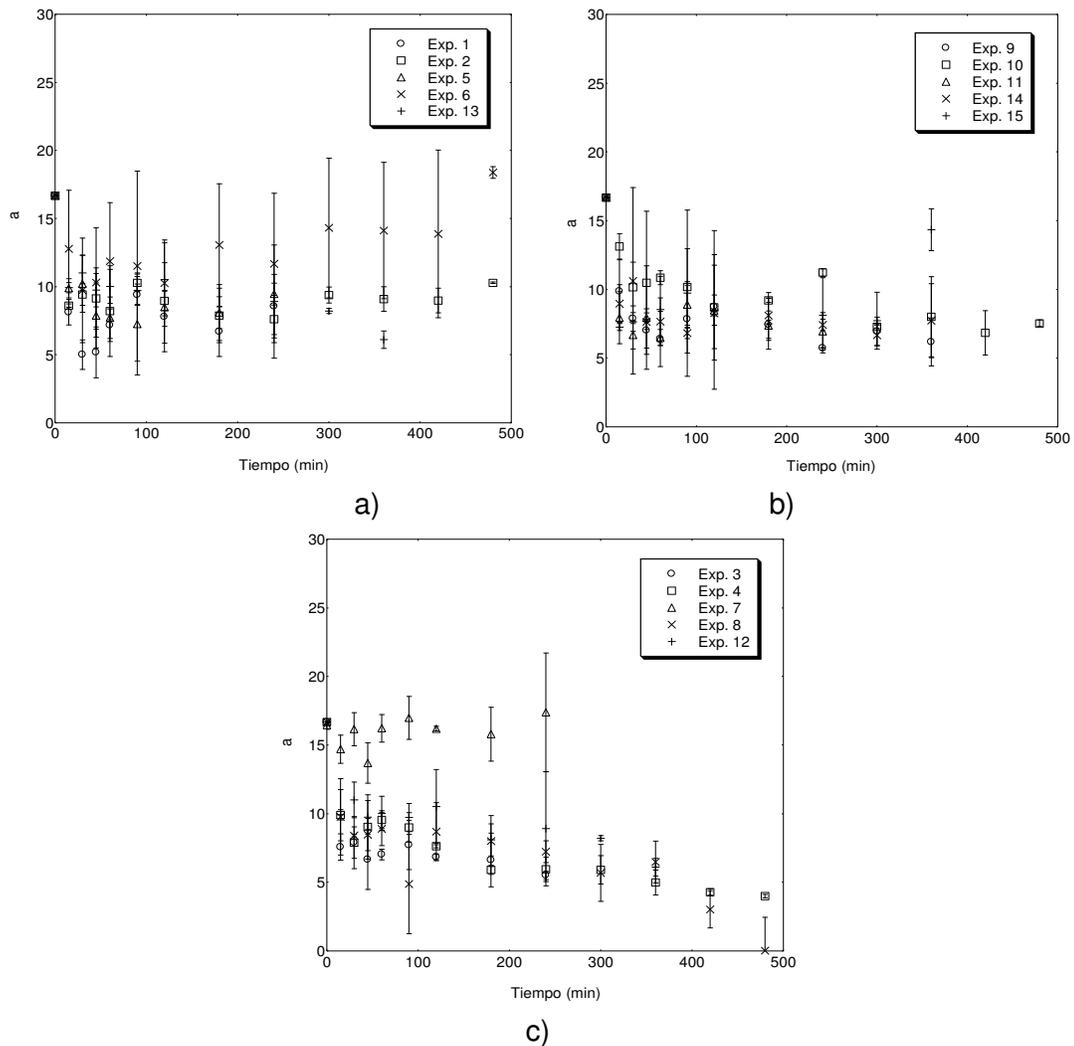


Figura 3.4 Evolución del color (parámetro **a**) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

El análisis estadístico con prueba de Dunnett ($\alpha=0.05$), indicó que para la mayoría de los experimentos realizados se presentó una diferencia significativa en el parámetro **a** con respecto al valor obtenido para el fruto fresco durante el procesamiento. Lo cual indica que las muestras sufren un ligero pardeamiento durante los diferentes tratamientos realizados. Sin embargo, el análisis estadístico indicó que para el experimento 7 no hubo cambios significativos en el valor de **a**; es posible que este resultado se deba a que estas muestras tuvieron un menor tiempo (4 h) de procesamiento.

La variación de los valores del parámetro **a** se puede atribuir a la degradación de pigmentos debido a la oxidación asociada con el flujo de aire convectivo. Resultados similares fueron reportados por Ahmed *et al.* 2004, y por Greiby *et al.* 2013 en el estudio de la degradación de color de puré de ciruela roja (var. Satluz) y de puré de cereza, respectivamente. Los autores reportaron que el incremento en el tiempo de secado decrece el parámetro **a**. Así mismo, las condiciones del secado convectivo (altas temperaturas y la presencia de oxígeno) pueden promover la actividad de la polifenoloxidasas, la cual da como resultado un pardeamiento en la muestra (Morales-Delgado, *et al.*, 2014).

3.2.3.3 Parámetro de color b

Como se puede observar en las gráficas de la Figura 3.5 y de acuerdo al análisis estadístico (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$) el parámetro de color **b** no presentó diferencia significativa con respecto al valor inicial en todos los experimentos realizados. Lo que indica que este parámetro no se afecta durante el proceso de secado por charolas en las diferentes condiciones estudiadas (Figura 3.5).

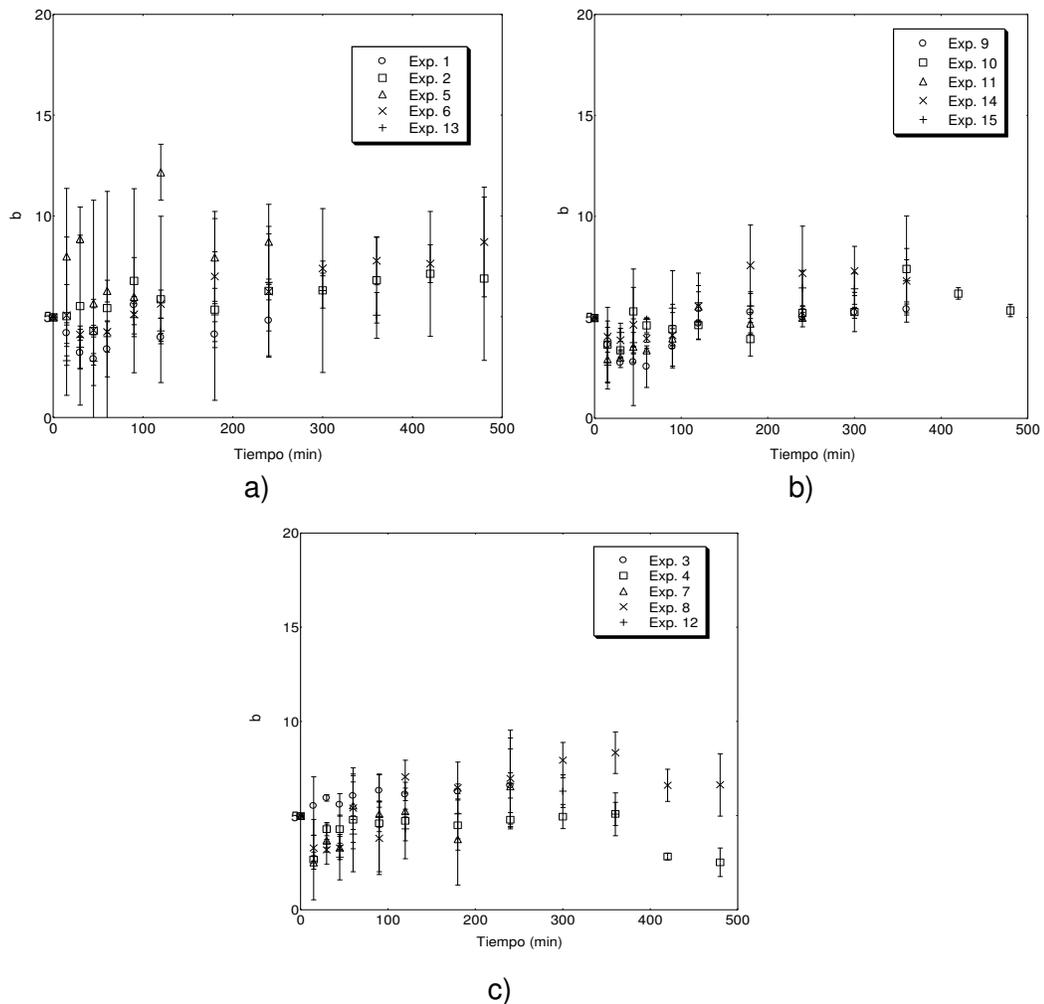


Figura 3.5 Evolución del color (parámetro b) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

3.2.3.4 Diferencia total de color ΔE

A partir de los parámetros de color **L**, **a** y **b**, la diferencia total de color (ΔE) durante el proceso de secado por charolas de rodajas de ciruela mexicana fue calculado (Ecuación 2.1). Se observó que en los experimentos realizados, la mayor variabilidad de color (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$) entre las muestras deshidratadas se presenta en la fase inicial (15 a 60 min) para los experimentos realizados (Figura 3.6).

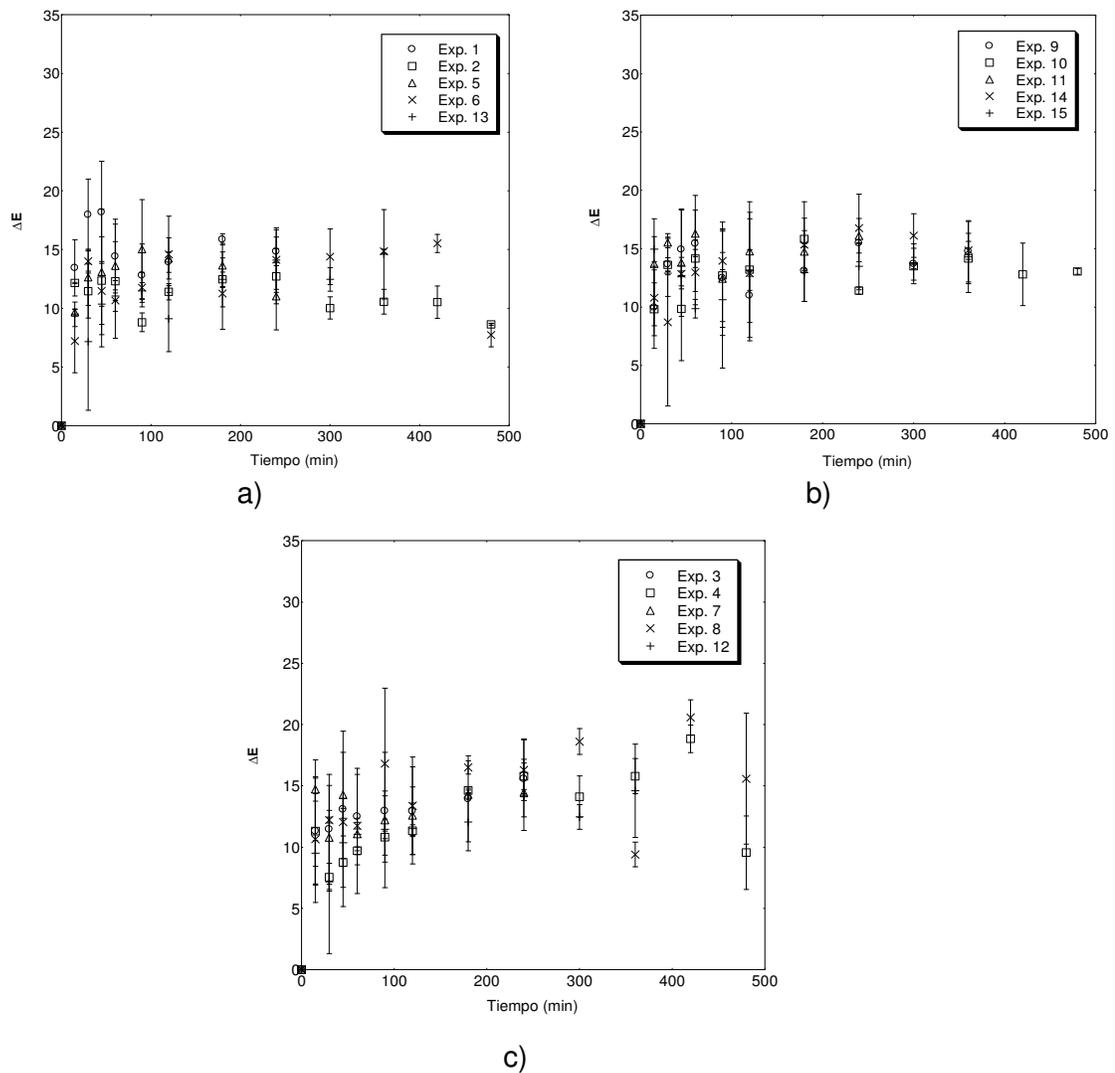


Figura 3.6 Evolución en la diferencia de color (ΔE) de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

Los cambios graduales presentados en los diferentes experimentos corresponden a las variaciones presentadas en los parámetros **L** y **a**. Efectos similares fueron reportados por Chen y Martynenko (2013) para el secado de arándanos silvestres y de arbusto bajo diferentes temperaturas de secado, en los cuales durante los primeros minutos del secado se presentó el mayor cambio de color y estabilizándose en la fase final del secado.

3.2.3.5 Color final de las rodajas de ciruela deshidratada

La Tabla 3.2 muestra las características finales de los parámetros de color de la ciruela deshidratada. El análisis estadístico (Prueba de Tukey $\alpha=0.05$) indicó que para los experimentos realizados existió diferencia significativa en la ΔE entre las muestras deshidratadas obteniéndose la menor diferencia de color cuando se empleó la menor temperatura de secado (Exp. 5).

Tabla 3.2 Resultado experimentales de los parámetros de color finales de rodajas de ciruela deshidratada.

Exp.	L	a	b	ΔE
1	14.64 ^{2.87}	8.73 ^{2.13}	4.97 ^{1.79}	14.84 ^{1.23}
2	15.13 ^{0.24}	10.29 ^{0.05}	7.46 ^{4.05}	8.62 ^{0.08}
3	16.01 ^{0.32}	5.51 ^{0.30}	6.61 ^{0.67}	15.59 ^{3.14}
4	6.11 ^{7.70}	2.08 ^{2.94}	1.55 ^{2.19}	9.54 ^{1.35}
5	17.14 ^{1.62}	9.46 ^{0.80}	8.72 ^{1.85}	6.69 ^{2.00}
6	9.17 ^{1.26}	9.04 ^{12.40}	3.46 ^{4.94}	7.37 ^{1.40}
7	17.39 ^{4.60}	17.65 ^{4.32}	6.69 ^{2.00}	14.46 ^{0.22}
8	17.23 ^{2.54}	6.59 ^{2.41}	6.73 ^{1.65}	15.58 ^{5.34}
9	14.63 ^{0.54}	6.31 ^{1.73}	5.4 ^{0.26}	14.78 ^{2.62}
10	15.58 ^{0.45}	7.36 ^{0.24}	5.34 ^{0.30}	13.05 ^{0.24}
11	14.75 ^{1.54}	7.02 ^{1.35}	4.99 ^{0.445}	16.10 ^{1.48}
12	14.66 ^{1.04}	6.13 ^{0.63}	2.50 ^{2.85}	6.91 ^{1.59}
13	12.37 ^{1.88}	6.45 ^{2.36}	5.13 ^{1.13}	14.60 ^{3.81}
14	17.71 ^{5.60}	7.95 ^{2.68}	6.91 ^{1.59}	14.85 ^{0.77}
15	18.24 ^{6.04}	9.38 ^{5.55}	6.85 ^{1.04}	14.28 ^{3.60}

El decremento en el parámetro **L** y **a** indicó que las muestras deshidratadas sufrieron un pardeamiento al final del proceso, estos resultados están relacionados con las reacciones de pardeamiento enzimático debido a la actividad de la polifenoloxidasas y a reacciones no enzimáticas (reacción de Maillard) (Delgado *et al.*, 2016); además la pérdida en los valores del parámetro **a** puede ser atribuido a la descomposición parcial de los pigmentos (antocianinas) de la ciruela debido a las altas temperaturas y el oxígeno empleado en el proceso (Chen y Martynenko, 2013; Morales-Delgado *et al.*, 2014).

Sin embargo, Contreras *et al.* (2008) destacan la dificultad de obtener una relación entre el color medido a través de las coordenadas de color (**L**, **a** y **b**) y la concentración de pigmentos, debido a que estos se encuentran distribuidos heterogéneamente, por lo cual la degradación de las antocianinas libres pueden no tener un impacto inmediato sobre los cambios visuales del color de los frutos. En lo que respecta al parámetro **b**, se observaron ligeras variaciones para las diferentes condiciones de secado empleadas; sin embargo, el análisis estadístico indicó que los resultados obtenidos no son significativamente diferentes. En la Figura 3.7 se muestra el color final de las rodajas de ciruela mexicana obtenidas mediante el proceso de secado por charolas.



Figura 3.7 Muestras de ciruela mexicana deshidratada en el secado por charolas.

3.2.4 Propiedades térmicas de la ciruela durante el proceso de secado por charolas

Las propiedades térmicas de los alimentos en los procesos térmicos determinan la velocidad de transferencia de calor en el interior del producto y son cruciales para el diseño de equipos, la predicción y control de los cambios que ocurren en los alimentos durante la transferencia de calor asociada con el almacenamiento y procesamiento de alimentos (Noche *et al.*, 2011).

De igual forma estas propiedades influyen sobre las características sensoriales de los alimentos (Mahapatra *et al.*, 2013), y son afectadas por el contenido de humedad, la densidad, y la temperatura entre otros, por eso la importancia de determinar las propiedades térmicas de la ciruela durante el proceso de secado.

3.2.4.1 Conductividad térmica

La determinación de la conductividad térmica (k) de las rodajas de ciruela deshidratadas mediante el secado por charolas fue calculada a partir de la ecuación empírica de Sweat (Ecuación 2.5); para lo cual se emplearon los datos experimentales de la pérdida de humedad obtenida en los diferentes tiempos de secado establecidos.

De acuerdo con los resultados obtenidos un decremento de la conductividad térmica es observada durante el proceso de secado para las diferentes condiciones evaluadas. En general, las curvas de la conductividad térmica (Figura 3.8) exhiben un comportamiento similar a las curvas de humedad, la cual empieza a disminuir a partir de los primeros 15, 30 y 60 min para la temperatura alta, media y baja (80, 65 y 50 °C), respectivamente; alcanzando una estabilidad del proceso para las temperaturas más altas (65 y 80 °C) a partir de 60 y 90 min y para la temperatura más baja a los 180 min, teniéndose al final del proceso en promedio valores de k entre 0.0523 y 0.0606 W/m·°C

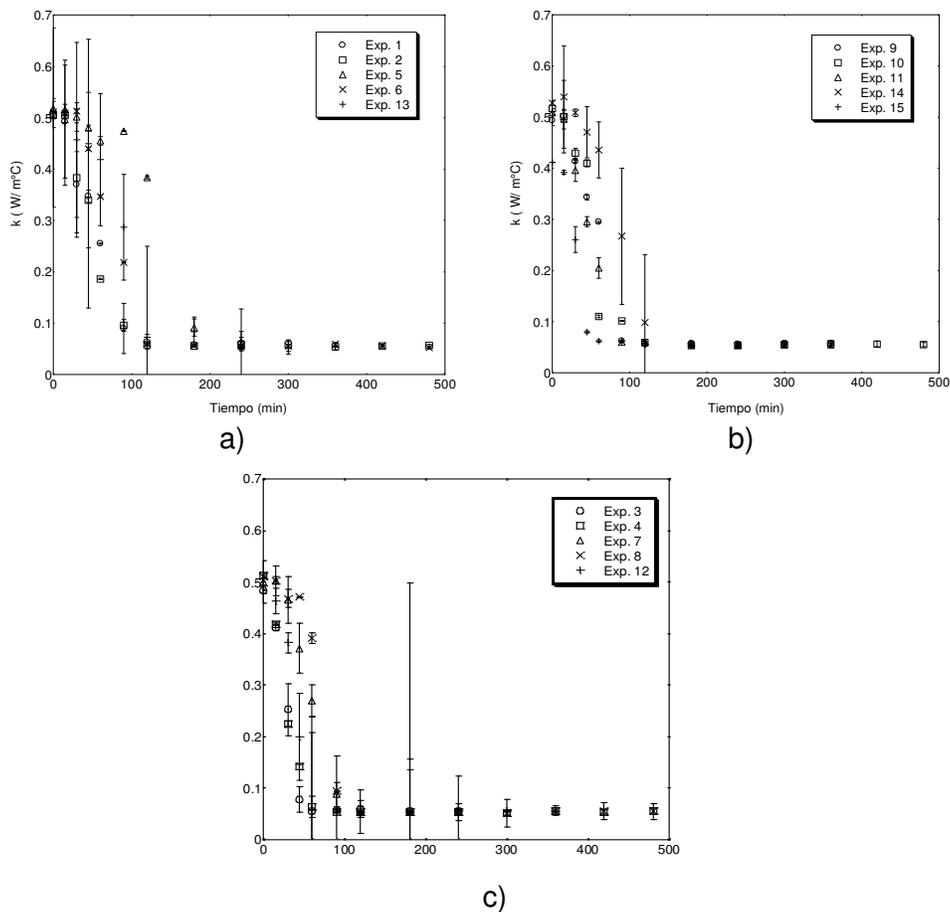


Figura 3.8 Evolución de la conductividad térmica de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

Resultados similares se han observado en otros estudios sobre las propiedades térmicas realizados a diversos productos agrícolas. Wang y Brennan (1992) y Espinoza-Guevara *et al.* (2010) realizaron un estudio sobre las propiedades térmicas de la papa, y la pulpa y corteza de la papaya cv. Maradol, respectivamente. Los investigadores observaron que la k disminuye a medida que el contenido de humedad desciende. En contraste Mahapatra *et al.* (2013) investigó los efectos del incremento de humedad sobre la k de harina de judías, observando que el aumento del contenido de humedad da lugar a un incremento en la conductividad térmica de la harina, por lo tanto el contenido de humedad tiene un efecto significativo en los valores de la conductividad térmica de los alimentos.

3.2.4.2 Calor específico

El calor específico (C_p) de la ciruela deshidratada mediante el proceso de secado por charolas fue determinado mediante la ecuación empírica de Singh y Heldman (Ecuación 2.6) la cual fue desarrollada para alimentos sólidos y líquidos, empleando datos experimentales de la pérdida de humedad durante el proceso de secado y calculando el calor específico a diferentes tiempos de secado convectivo. En la Figura 3.8 se muestra la evolución del calor específico de las rodajas de ciruela mexicana.

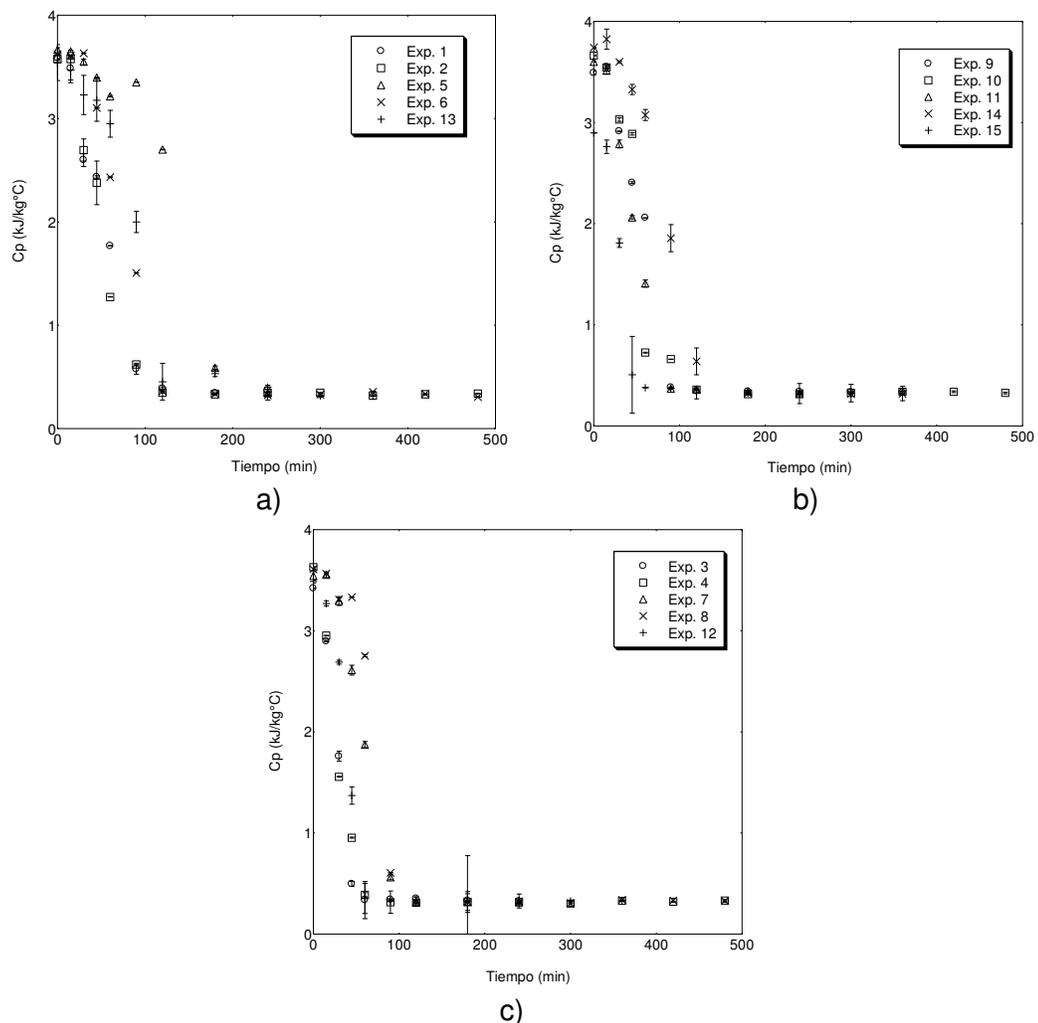


Figura 3.9 Evolución del calor específico de la ciruela durante el proceso de secado por charolas: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

El calor específico inicial de las muestras empleadas fue 3.56 kJ/kg°C (ciruela betabel) el cual se reduce significativamente con la aplicación del proceso de secado por charolas. En la Figura 3.9 se observa el comportamiento del calor específico de las rodajas de ciruela, el cual empieza a disminuir a partir de los primeros 15, 30 y 60 min para las temperaturas de 80, 65 y 50 ° C, respectivamente. Se observó que al emplear las temperaturas de secado más de altas la estabilidad del C_p se alcanzó a partir de 60 y 90 min y para la temperatura más baja a los 180 min, teniéndose al final del proceso en promedio valores de C_p entre 0.3076 y 0.3678 kJ/kg·°C.

Estos resultados son similares a los reportados por otros investigadores para el calor específico de diferentes materiales alimenticios (Tansakul y Lumyong, 2008; Aghbashlo *et al.*, 2008). Abhayawick *et al.* (2002) evaluaron el comportamiento del C_p para tres variedades de cebolla donde se observa una variación lineal con el contenido de humedad (4.01 a 0.9 kJ/kg°K). Esta disminución se debe a que el alimento pierde agua durante el proceso de secado. El agua es la segunda sustancia con mayor calor específico y uno de los mayores constituyentes de los materiales alimenticios, por lo cual al perder gran parte de este componente se pierde en gran medida el calor específico (Serpil y Sermet, 2006)

3.2.4.3 Propiedades térmicas al final del proceso de secado por charolas

En la Tabla 3.3 se presentan los resultados finales de las propiedades térmicas de la ciruela betabel deshidratada. El análisis estadístico con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) aplicado en los resultados finales de los parámetros de conductividad térmica y calor específico indican que no hubo un efecto significativo de las variables estudiadas al final del proceso de secado.

Tabla 3.3 Resultado experimentales de las propiedades térmicas de rodajas de ciruela deshidratada.

Exp.	k (W/ m·°C)	C_p (kJ/ kg·°C)
1	0.0606 ^{0.0071}	0.3678 ^{0.0512}
2	0.0566 ^{0.0014}	0.3391 ^{0.0098}
3	0.0550 ^{0.0060}	0.3281 ^{0.0465}
4	0.0558 ^{0.0038}	0.3334 ^{0.0272}
5	0.05760 ^{0.0047}	0.3460 ^{0.0338}
6	0.0523 ^{0.0012}	0.3076 ^{0.0089}
7	0.0533 ^{0.0032}	0.3153 ^{0.0228}
8	0.0553 ^{0.0089}	0.3294 ^{0.0642}
9	0.0558 ^{0.0056}	0.3335 ^{0.0417}
10	0.0549 ^{0.0041}	0.3267 ^{0.0293}
11	0.0546 ^{0.0051}	0.3245 ^{0.0370}
12	0.0555 ^{0.0052}	0.3308 ^{0.0373}
13	0.0534 ^{0.0007}	0.3156 ^{0.0053}
14	0.05730 ^{0.0027}	0.31790 ^{0.0195}
15	0.0541 ^{0.0041}	0.3208 ^{0.0296}

Como se menciona en las secciones anteriores las propiedades térmicas tienen una relación lineal con la humedad de las muestras deshidratadas. Phomkong *et al.* 2006 señala que las propiedades térmicas de los frutos de hueso (ciruela, nectarina y durazno) durante el secado presentan una fuerte dependencia con la humedad, pero no son dependientes de la temperatura. Los resultados encontrados en este estudio para el comportamiento de las propiedades térmicas de la ciruela son similares a los reportados para otros materiales alimenticios (Gabas *et al.*, 2005; Aghbashlo *et al.*, 2008; Tansakul y Lumyong, 2008).

3.2.5 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela deshidratada

Los productos deshidratados son buena fuente de energía, minerales y vitaminas. Sin embargo, durante el proceso de deshidratación estos pueden sufrir cambios en la retención de nutrientes. Por lo tanto, con el objetivo de verificar la influencia del

proceso de secado sobre la retención de nutrientes en las rodajas de ciruela. Se analizó el contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico (titulación ácida) del producto final deshidratado. En la Tabla 3.4 se muestran los resultados experimentales obtenidos en las rodajas de ciruela deshidratada.

Tabla 3.4 Resultado experimentales finales del contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de rodajas ciruela deshidratada.

Exp	Pectina (%)	Ácido Ascórbico (mg/100g)	Ácido cítrico (%)
1	1.0255 ^{0.0527}	17.6878 ^{0.0358}	2.1408 ^{0.0077}
2	0.9301 ^{0.1199}	18.1023 ^{0.02345}	2.5533 ^{0.0164}
3	2.2405 ^{0.8186}	17.6295 ^{0.0082}	2.1010 ^{0.0149}
4	1.7554 ^{0.4536}	13.9251 ^{0.0252}	2.4760 ^{0.0048}
5	1.8158 ^{0.5109}	10.8080 ^{0.1335}	2.1084 ^{0.0015}
6	1.6269 ^{0.3657}	11.3386 ^{0.1161}	2.3812 ^{0.0023}
7	1.7477 ^{0.4474}	11.1675 ^{0.0343}	1.8397 ^{0.0057}
8	1.2523 ^{0.1151}	17.9759 ^{0.1733}	2.1317 ^{0.0085}
9	1.9806 ^{0.6196}	12.7617 ^{0.0289}	2.3128 ^{0.0039}
10	1.6066 ^{0.4085}	17.8174 ^{0.0974}	2.7048 ^{0.0050}
11	1.6266 ^{0.3582}	22.1804 ^{0.0044}	2.1585 ^{0.0087}
12	1.9504 ^{0.6016}	19.2425 ^{0.4470}	2.5046 ^{0.0115}
13	1.9028 ^{0.5557}	17.8757 ^{0.1252}	1.8621 ^{0.0039}
14	1.4538 ^{0.2507}	11.8763 ^{0.1613}	2.4464 ^{0.0029}
15	3.6623 ^{1.8078}	17.5835 ^{0.0134}	2.1708 ^{0.0058}

El contenido de pectina de los alimentos deshidratados es dependiente de las condiciones de extracción y del método de secado (Monsoor, 2005). El análisis de varianza (ANOVA) reveló que la temperatura de secado y el tamaño de la muestra tienen una influencia significativa ($p < 0.05$) sobre el contenido de pectina de las muestras, los resultados indicaron que las ciruelas deshidratadas con una temperatura de 50 °C y con un tamaño de muestra de 1 cm presentan el menor contenido de pectina. Estos resultados pueden ser atribuidos a que la pectina es susceptible a la degradación por enzimas tales como las petinmetilesterasas que causan reblandecimiento en las láminas que forman la estructura de los tejidos de los frutos cuando son deshidratadas a bajas temperaturas y al incremento del área

superficial de las rodajas de ciruela expuestas al oxígeno (Contreras *et al.*, 2008; Chan y Choo, 2013).

El contenido de ácido ascórbico y ácido cítrico obtenido en las rodajas de ciruela deshidratada fluctuaron en un rango de 10.8080 - 22.1804 mg/100g y 1.8397 - 2.7048 %, respectivamente (Tabla 3.4). El análisis de varianza (ANOVA) reveló que los factores de estudio no influyen significativamente ($p > 0.05$) sobre la retención de la vitamina C y el ácido cítrico de las muestras deshidratadas.

En general, se observó una mayor retención de ambos ácidos cuando se empleó la temperatura de operación de 65 y 80 °C en comparación con las muestras deshidratadas a la temperatura de 50 °C De acuerdo con Erenturk *et al.* 2005 el empleo de temperaturas de secado bajas, representa una gran pérdida de compuestos al inicio del secado debido al alto contenido de humedad en el alimento, seguido de un periodo de degradación menos rápida a medida que disminuye el contenido de humedad. Sablani (2006) reportó que en los procesos de secado después de la temperatura, el contenido de humedad es probablemente el parámetro que tiene un mayor efecto sobre la pérdida de nutrientes.

Además Goula y Adamopoulos (2006) mencionan que a bajas actividades de agua el ácido ascórbico es relativamente estable, mientras que a una mayor a_w se destruye rápidamente. De acuerdo con los resultados, el contenido de vitamina C y ácido cítrico fue menor en las rodajas de 3 cm de diámetro las cuales presentaron un alto a_w al final del secado en comparación con las rodajas de 1 cm que al tener una mayor superficie de contacto poseen contenidos de a_w bajos.

3.3 Optimización del proceso de secado por charolas de ciruela mexicana

Se estableció realizar la optimización del proceso de secado por charolas de ciruela mexicana, con la finalidad de minimizar el costo para obtener un producto aceptable (baja a_w , X, ΔE y alta producción). Para lo cual se empleó la metodología de

superficie de respuesta, ya que esta proporciona datos para evaluar respuestas y generar modelos matemáticos estadísticamente válidos que pueden ser empleados para la interpretación gráfica del proceso (Corzo *et al.*, 2008; Sturm *et al.*, 2012).

3.3.1 Características finales de la ciruela mexicana deshidratada

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados finales de actividad de agua, humedad y diferencia total de color de los experimentos realizados para la ciruela mexicana (betabel) deshidratada mediante secado por charolas.

Tabla 3.5 Resultado experimentales finales de rodajas de ciruela deshidratada.

Exp.	a_w	X (g H ₂ O/ g s.s.)	ΔE
1	0.3477 ^{0.0074}	0.0181 ^{0.0255}	14.84 ^{1.23}
2	0.4210 ^{0.0012}	0.0113 ^{0.0023}	8.62 ^{0.08}
3	0.3613 ^{0.0685}	0.0116 ^{0.0685}	15.59 ^{3.14}
4	0.3453 ^{0.0986}	0.0109 ^{0.0065}	9.54 ^{1.35}
5	0.4608 ^{0.1213}	0.0141 ^{0.0081}	6.69 ^{2.00}
6	0.3458 ^{0.0714}	0.0040 ^{0.0021}	7.37 ^{1.40}
7	0.3741 ^{0.0124}	0.0067 ^{0.0054}	14.46 ^{0.22}
8	0.2965 ^{0.0308}	0.0140 ^{0.0153}	15.58 ^{5.34}
9	0.3974 ^{0.0470}	0.0121 ^{0.0100}	14.78 ^{2.62}
10	0.3804 ^{0.0350}	0.0096 ^{0.0070}	13.05 ^{0.24}
11	0.3858 ^{0.0516}	0.0099 ^{0.0077}	16.10 ^{1.48}
12	0.4028 ^{0.0346}	0.0112 ^{0.0089}	6.91 ^{1.59}
13	0.3905 ^{0.0449}	0.0057 ^{0.0013}	14.60 ^{3.81}
14	0.2465 ^{0.0619}	0.0070 ^{0.0047}	14.85 ^{0.77}
15	0.3760 ^{0.0113}	0.0085 ^{0.0071}	14.28 ^{3.60}

El análisis estadístico (ANOVA) reveló que las variables independientes no influyeron significativamente ($p > 0.05$) sobre la a_w y X de las muestras deshidratadas. En general la actividad de agua y la humedad de la ciruela deshidratada a las diferentes condiciones estudiadas decrece a valores menores a 0.6 y 0.2 g H₂O/g s.s., lo anterior indica que el producto obtenido al final del procesamiento es altamente

estable y apto para el almacenamiento, ya que cumple con el estándar industrial para el almacenamiento de frutos secos (Rajkumar *et al.*, 2007; Perussello *et al.*, 2009). Resultados similares fueron obtenidos por Ioannou *et al.* (2011), para el secado de túnel de ciruela Mirabelle donde reportaron para las muestras deshidratadas una humedad de 0.2 g H₂O/g s.s., la cual correspondía a una a_w baja (0.5) que conlleva a la conservación del producto.

Con respecto a la diferencia total de color (ΔE), el análisis de varianza (ANOVA) indicó que los factores evaluados no tuvieron un efecto significativo ($p > 0.05$) sobre ΔE ; sin embargo, se observó que las muestras deshidratadas a una temperatura de 65 y 80 °C presentaron una mayor diferencia de ΔE con respecto a las muestras deshidratadas a 50 °C. De acuerdo con la literatura, el secado de frutos rojos con aire caliente a altas temperaturas da como resultado una concentración/degradación de los pigmentos rojos durante la deshidratación de la fruta, y promueve el desarrollo de compuestos oscuros pigmentados que tienden a enmascarar el color (Chen y Martynenko, 2013; Franceschinis *et al.*, 2015; Delgado *et al.*, 2016).

3.3.2 Consumo de energía, producción y costo de la ciruela mexicana deshidratada

Uno de los retos más importantes en la deshidratación de frutas y verduras es la reducción del consumo de energía por lo que se efectúan análisis para obtener productos a un menor costo y de calidad aceptable (Aviara *et al.*, 2014).

La energía total requerida (Tabla 3.6) para cada condición de secado se encuentran en un rango entre 0.5628 y 1.0252 kW, estos valores son menores a los reportados para el secado convectivo (1.6 – 2.5 kW) y conductivo (1.5 - 1.7 kW) de alimentos (Almeida-Trasviña, *et al.*, 2014). De acuerdo con los resultados obtenidos, la energía requerida para secar las muestras de ciruela fue menor cuando se empleó una temperatura de secado de 50 °C y 4 h de procesamiento. Resultados similares fueron reportados para el análisis del consumo de energía de rodajas de taro, arilos

de granada y rodajas de coroba, donde el menor requerimiento de energía se presentó al emplear la menor temperatura de secado (Corzo *et al.*, 2008; Afolabi *et al.*, 2014; Calín-Sánchez *et al.*, 2014).

Tabla 3.6 Resultados experimentales de consumo de energía, producción y costo de rodajas de ciruela deshidratada.

Exp.	Energía (kW)	Producción (kg/h)	Costo (\$·kg ⁻¹)
1	0.6426	0.0117	38.80
2	0.5428	0.0056	40.51
3	0.7930	0.0111	40.96
4	0.9046	0.0056	40.69
5	0.4623	0.0113	40.11
6	0.7639	0.0054	42.34
7	0.9792	0.0112	40.65
8	0.8257	0.0056	40.90
9	0.6582	0.0075	40.43
10	0.4546	0.0056	40.69
11	1.0252	0.0105	43.45
12	0.7523	0.0075	40.34
13	0.5693	0.0070	43.21
14	0.7116	0.0074	40.95
15	0.5628	0.0073	41.51

En lo que se refiere a la producción y costo (Tabla 3.6) de las rodajas de ciruela mexicana deshidratadas, el análisis de varianza (ANOVA) indicó que la temperatura de secado y el tiempo de secado tienen un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre ambas variables de respuesta. La producción de ciruela deshidratada aumentó en los tratamientos donde se empleó la menor temperatura (50 °C) y el menor tiempo de secado (4 h); mientras el costo del producto deshidratado presentó un incremento al aumentar la temperatura y el tiempo de procesamiento de las rodajas de ciruela mexicana.

3.3.3 Superficies de respuesta

Los datos experimentales obtenidos de la actividad de agua (a_w), humedad (X), diferencia total de color (ΔE), producción (P) y costo (C_T) de la ciruela deshidratada (Tabla 3.5 y 3.6) se emplearon para desarrollar por medio de regresión lineal múltiple, polinomios de segundo orden; los cuales fueron empleados para predecir el comportamiento de las variables de respuesta en función de los factores estudiados (temperatura de secado, tiempo de secado y diámetro de muestra) representándose mediante la elaboración de gráficos de superficie de respuesta.

3.3.3.1 Actividad de agua

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente para la actividad de agua (Tabla 3.5), se realizó la regresión lineal en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 67.8 se indica en la Ecuación 3.1

$$a_w = 0.371 - 0.0186 x_1 - 0.0141 x_2 - 0.0128 x_3 - 0.0065 x_1 x_2 - 0.0092 x_1 x_3 - 0.0312 x_2 x_3 + 0.0316 x_1^2 + 0.0181 x_2^2 - 0.0538 x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

En la Figura 3.10 se presenta la gráfica de superficie de respuesta de la a_w de la ciruela deshidratada como función de la temperatura de secado, tiempo de secado y diámetro de la muestra. El análisis de varianza (ANOVA) demostró que las variables evaluadas no tuvieron un efecto significativo sobre el contenido de actividad de agua de las rodajas de ciruela deshidratada. Las condiciones evaluadas generaron productos con un a_w menor de 0.6 lo cual provee un alto grado de estabilidad microbiológica y química debido a la remoción de agua presente en la ciruela, permitiendo que el alimento pueda ser conservado y se encuentre disponible a través del tiempo (Domínguez-Niño *et al.*, 2016).

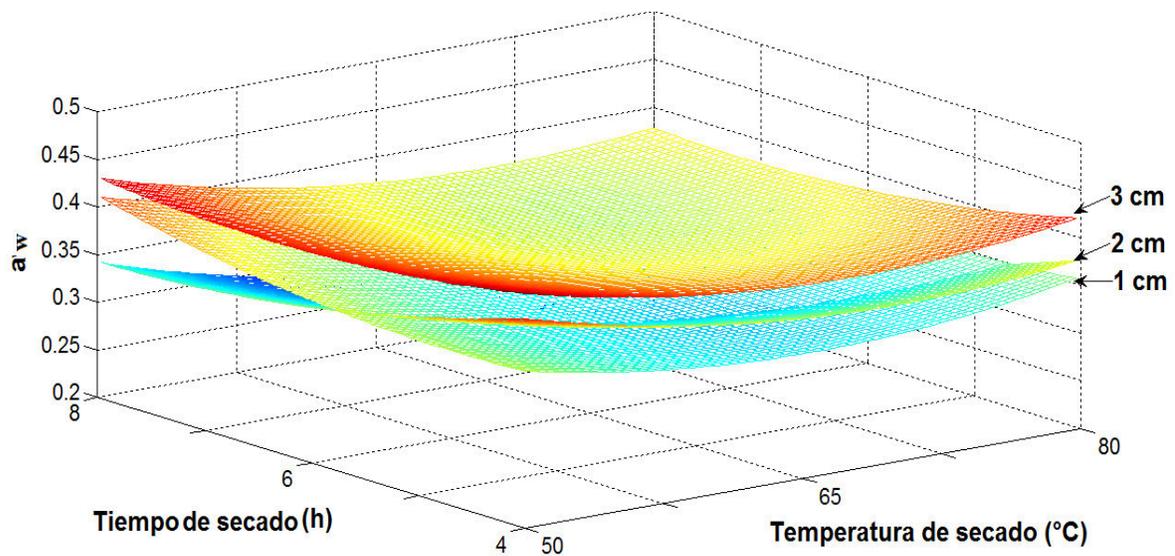


Figura 3.10 Superficie de respuesta de a_w como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra.

Se observó que las muestras que presentaron un menor contenido de a_w fueron aquellas que se deshidrataron a una temperatura de 80 °C con un diámetro de muestra de 2 cm durante el tiempo de secado más prolongado (8 h). Los resultados mostraron que la a_w de las rodajas aumentó cuando se empleó un diámetro de rodaja de 3 cm; sin embargo también obtuvieron a_w aceptables con lo que proveen una alta estabilidad al producto.

En el caso de las rodajas de 1 cm se pudo observar que al emplear un proceso de secado prolongado (8 h) se obtiene una a_w superior que al emplear tiempos de procesamiento menores (4 h). Erbay e Icier (2009) indican que el empleo de tasas de transferencia de calor extremas puede causar “caso de endurecimiento” en el secado de productos biológicos; es decir, este comportamiento se presenta cuando los alimentos se secan con transferencias de calor prolongadas, causando un encogimiento de los capilares parcialmente vacíos y evitando la eliminación de agua en lugares más profundos. Un comportamiento similar a los obtenidos en este estudio fueron reportados por Aghbashlo *et al.* (2008) y Fang *et al.* (2009) para el secado convectivo de bérbero y jujube, respectivamente. Los autores observaron que al incrementar el tiempo de secado para eliminar el agua de la fruta se produjo un

endurecimiento y/o encogimiento del material, con lo cual se redujo la remoción de agua del fruto.

3.3.3.2 Humedad

A partir de los resultados experimentales de humedad (Tabla 3.5) se desarrolló el modelo de segundo grado por regresión lineal para el contenido de humedad (Ecuación 3.2) el cual obtuvo un coeficiente de correlación de 71.5.

$$X = 0.00869 + 0.000120x_1 - 0.00106x_2 - 0.00146x_3 + 0.00294x_1x_2 + 0.00119x_1x_3 + 0.00059x_2x_3 + 0.00061x_1^2 + 0.00191x_2^2 - 0.00009x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

La gráfica de superficie de respuesta para el contenido de humedad a las diferentes condiciones experimentales se presenta en la Figura 3.11. De acuerdo al análisis estadístico, las variables independientes no influyeron de manera significativa sobre la X final.

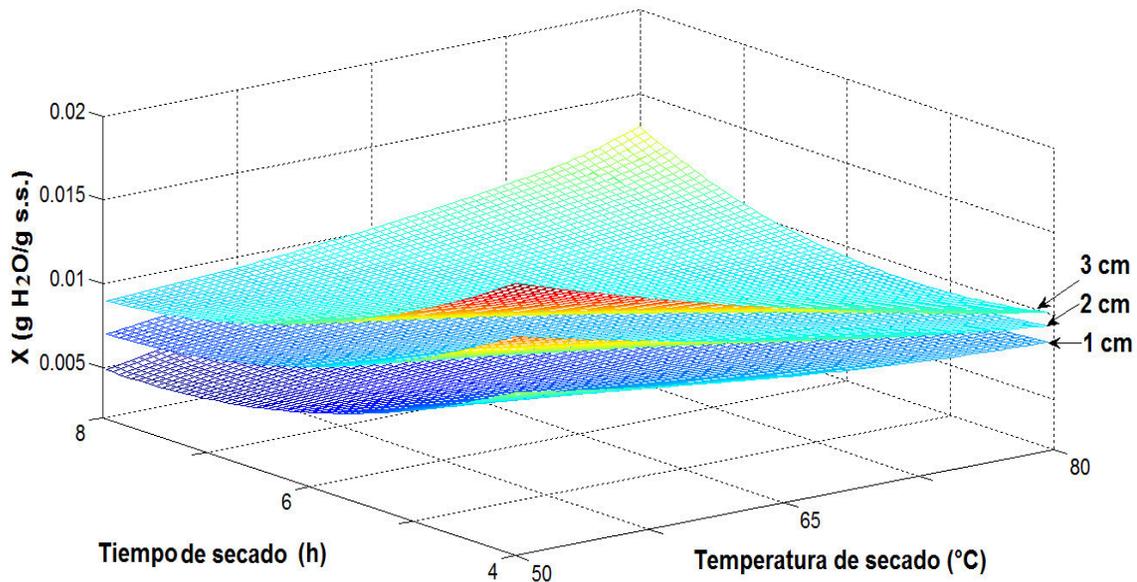


Figura 3.11 Superficie de respuesta de X como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra.

En la Figura 3.11 se muestra que el incremento de la temperatura y tiempo de secado para los tres diámetros de muestra empleadas disminuye el contenido de humedad final. Se observó que las muestras que presentaron un menor contenido de

humedad fueron aquellas que se deshidrataron a 80 °C con un diámetro de muestra de 1 cm y empleando un tiempo de procesamiento de 8 h. Un comportamiento similar a los resultados obtenidos fueron reportados por Corzo *et al.* (2008) y Sturm *et al.* (2012) para el secado por aire caliente de rodajas de coroba y manzana, respectivamente; quienes observaron que las altas temperaturas reducen el tiempo de secado significativamente.

El control de la temperatura de secado es importante, ya que la cantidad de humedad que se elimina disminuye constantemente, lo que se traduce en largos tiempos de secado (para alcanzar contenidos de humedad finales menores a 0.1 g H₂O/ g.s.s.) lo cual puede influir en las características del producto final (Villalpando-Guzmán *et al.*, 2011).

Así mismo, se observó una tendencia decreciente de la humedad al disminuir el diámetro de muestra de 3 a 1 cm de diámetro, lo anterior debido al aumento del área superficial de las muestras de menor diámetro. Por lo tanto, la velocidad de secado incrementa a medida que el tamaño de muestra disminuye (Law y Mujumdar, 2014). Esta observación es congruente con lo reportado por Lozano-Acevedo *et al.* (2011), quienes observaron que la reducción del diámetro de muestra de minihojuelas de papa (1.5 a 0.5 cm) pretratadas en ácido cítrico y deshidratadas a temperatura constante, disminuyó el contenido de humedad del producto final. Gupta *et al.*, (2013) reportaron que el secado de pequeñas piezas de alimento requiere un menor tiempo de procesamiento manteniendo una temperatura de secado constante. De manera similar, la reducción en el tiempo de secado para diferentes rebanadas de mango (ovalado, transversal y longitudinal) fue evaluado por Villalpando-Guzmán *et al.* (2011). Los autores reportaron que las muestras ovaladas requirieron del doble de tiempo para deshidratarse en comparación con las muestras transversales y longitudinales.

3.3.3.3 Diferencia total de color

Los resultados de la diferencia total de color (ΔE) de las rodajas de ciruela deshidratada obtenidos para las diferentes condiciones de secado (Tabla 3.5) se analizaron para obtener el modelo de segundo grado por regresión lineal. El modelo matemático que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 65.7 para ΔE de la ciruela deshidratada está representado en la ecuación 3.3

$$\Delta E = 14.3 + 1.00 x_1 - 1.35 x_2 - 0.39 x_3 + 0.08 x_1 x_2 + 1.79 x_1 x_3 + 1.76 x_2 x_3 - 3.47 x_1^2 + 0.35 x_2^2 + 0.34 x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

En la Figura 3.12 se muestra el efecto de la interacción de la temperatura de secado, tiempo de secado y diámetro de rodaja sobre la diferencia total de color de la ciruela deshidratada.

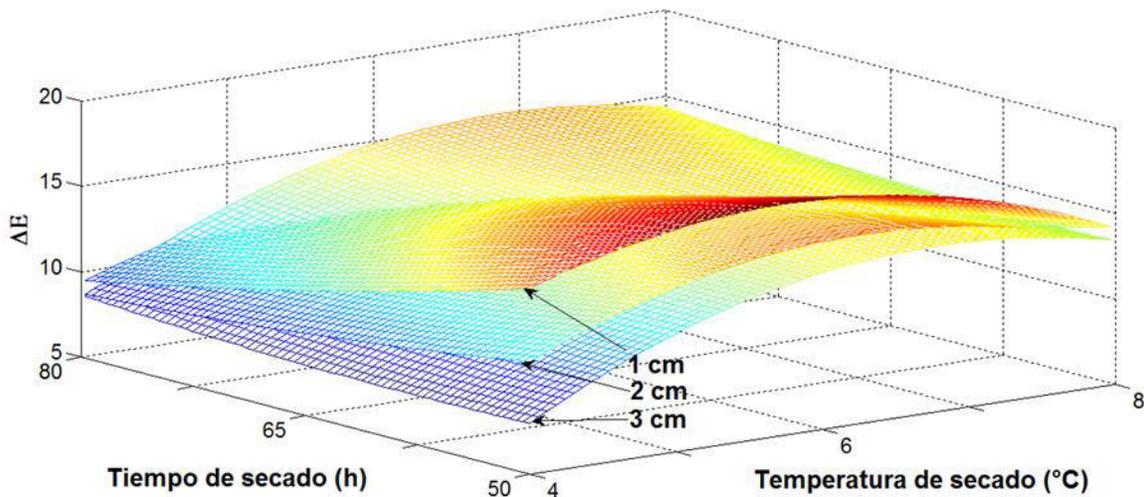


Figura 3.12 Superficie de respuesta de ΔE como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra.

En este gráfico (Figura 3.12) se puede observar que la diferencia total de color es mayor conforme se incrementa el tiempo de secado de 4 a 8 h. En el caso del secado con aire caliente de frutos se reportó que el procesamiento durante tiempos prolongados da lugar a reacciones de pardeamiento en la superficie del producto y a destrucción de pigmentos (Chen y Martynenko, 2013). Al respecto Awuah *et al.* (2007) menciona que los pigmentos naturales son susceptibles a la degradación por

calor. La pérdida de pigmentos (antocianinas) en la ciruela está relacionado al uso de temperaturas elevadas de secado; así como a la exposición de grandes cantidades de oxígeno por tiempos de secado prolongados (Morales-Delgado, *et al.*, 2014). En estudios realizados a diversas variedades de ciruela de la especie *Prunus domestica* se observó que el secado convectivo induce a la formación de pigmentos pardos lo cual reduce notablemente su parecido con el fruto fresco (Tarhan *et al.*, 2007; Michalska *et al.*, 2016).

De igual manera se observa una tendencia creciente de la diferencia total de color al disminuir el diámetro de la rodaja de 3 a 1 cm, posiblemente al hecho de que un menor diámetro de muestra da lugar a una mayor superficie de contacto. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Villalpando-Guzman *et al.* 2011 quienes observaron que durante el proceso de secado de mango, las muestras de menor tamaño presentaron puntos marrones en comparación con muestras de mayor tamaño deshidratadas a la misma temperatura.

En la literatura se menciona que el cambio de color es atribuido a los tiempos prolongados de exposición al aire, al encogimiento de la matriz celular causado por la pérdida de agua durante la deshidratación y la generación de pigmentos marrones, los cuales cambian el rendimiento óptico y conducen a un aumento en la ΔE de los alimentos (Sturm *et al.*, 2012; Marquez *et al.*, 2013)

3.3.3.4 Producción

Se realizó la regresión lineal de los resultados obtenidos experimentalmente para la producción de ciruela mexicana deshidratada (Tabla 3.6) El modelo matemático obtenido con un coeficiente de correlación de 99.3 está representado por la ecuación 3.4.

$$\begin{aligned} \text{Producción} = & 0.00723 + 0.000007 x_1 - 0.00279 x_2 - 0.000043 x_3 - \quad (\text{Ec. 3.4}) \\ & 0.000112 x_1x_2 - 0.000087 x_1x_3 + 0.000005 x_2x_3 - 0.000118 x_1^2 + \\ & 0.0000880 x_2^2 - 0.000202 x_3^2 \end{aligned}$$

En la Figura 3.13 se ilustra la gráfica de superficie de respuesta para predecir la producción de la ciruela deshidratada en función de las variables de proceso estudiadas. El análisis de varianza (ANOVA) demostró que las variables tiempo de secado y la interacción de factores temperatura y tiempo de secado influyeron significativamente sobre la producción de ciruela deshidratada.

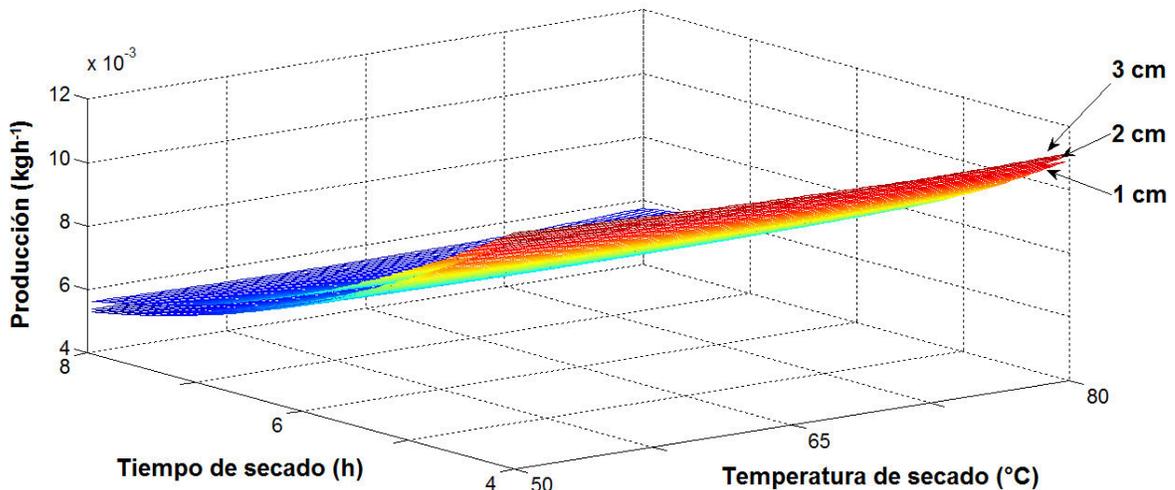


Figura 3.13 Superficie de respuesta de producción como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra.

En la gráfica (Figura 3.13) se observa que la producción de ciruela aumenta cuando se reduce la temperatura y el tiempo de secado, esto debido a que en estas condiciones el producto obtenido posee un contenido de humedad mayor que las muestras deshidratadas por tiempos prolongados. Esta observación es congruente con lo reportado por Pérez-Francisco *et al.* (2008) quienes evaluaron la optimización del proceso de secado por charolas de rodajas de chayote, los investigadores reportaron que la producción más alta se obtenía cuando se aplicaban las temperaturas bajas de procesamiento, resultando en productos deshidratados con mayor contenido de humedad.

Diversos investigadores han reportado comportamientos similares para diferentes materiales alimenticios, en los cuales el uso de bajas temperaturas da lugar a humedades mayores, y esto incrementa el peso del producto seco aumentando su

producción (Luna-Solano *et al.*, 2005; Rosas *et al.*, 2011; Kozanoglu *et al.*, 2012; Domínguez-Niño *et al.*, 2017)

3.3.3.5 Costo

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del costo de producción del proceso unitario de secado de ciruela (Tabla 3.6) en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 35.9 está definido por la ecuación 3.5

$$\text{Costo} = 41.7 - 0.144 x_1 + 0.117 x_2 + 0.248 x_3 - 0.496 x_1 x_2 - 0.406 x_1 x_3 + 0.130 x_2 x_3 - 0.252 x_1^2 + 0.040 x_2^2 - 0.796 x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

En la Figura 3.14 se muestra el efecto de la interacción de la temperatura de secado, tiempo de secado y diámetro de rodaja sobre el costo de producción de ciruela deshidratada. De acuerdo con los resultados obtenidos el costo de producción durante el proceso de secado se encontró en un rango de 38.80 – 43.45 \$·kg⁻¹.

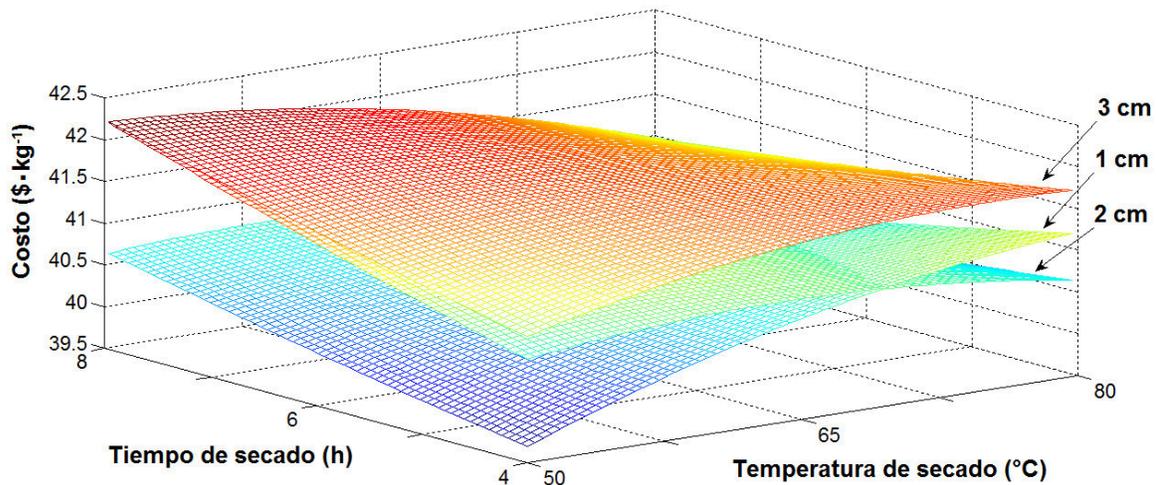


Figura 3.14 Superficie de respuesta de costo como una función de temperatura de secado, tiempo y diámetro de muestra.

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que la interacción temperatura de secado y tiempo de secado influyeron significativamente sobre la variable de respuesta. Se observó que a mayor temperatura y tiempo de secado el costo de producción

aumenta, esto era esperado por que el empleo de altas temperaturas aumenta el costo de la energía. Ese comportamiento es congruente con lo reportado por Pérez-Francisco *et al.* (2008) quienes reportaron que el costo del proceso disminuye cuando se emplean temperaturas de procesamiento bajas. Otros trabajos donde se ha evaluado el costo del proceso unitario del secado convectivo de materiales alimenticios han demostrado que las altas temperaturas durante el procesamiento da lugar a un mayor costo del proceso (Luna-Solano *et al.*, 2005; Domínguez-Niño *et al.*, 2017).

3.3.4 Gráficos de contornos

A partir de los modelos de segundo orden descritos en la sección anterior se generaron los gráficos de contornos para cada una de las variables de respuesta (actividad de agua, humedad, diferencia total de color, producción y costo) empleando el software Minitab 10. Se realizó un análisis de las regiones óptimas para cada factor con la finalidad de obtener las zonas factibles para localizar el valor mínimo o máximo deseado.

3.3.4.1 Actividad de agua

En la Figura 3.15a se observa que la región que presentó una menor a_w (menor a 0.37) se obtuvo a una temperatura de secado de 63.95 a 76.25 °C (valores codificados de -0.07 y 0.75) y un tiempo de secado de 5.8 a 8 h (valores codificados de 0.1 y 1). En lo que respecta a la Figura 3.15b se puede observar un punto de silla, debido a esto es difícil dar una interpretación ya que no se cuenta con una región donde se encuentre un máximo o un mínimo. Finalmente en la Figura 3.15c se observa que la región que presentó el menor contenido de a_w (menor a 0.305) se obtuvo a un tiempo de secado de 6 a 8 h (valores codificados de 0 y 1) y un diámetro de muestra de 2.8 a 3 cm (valores codificados de 0.8 y 1).

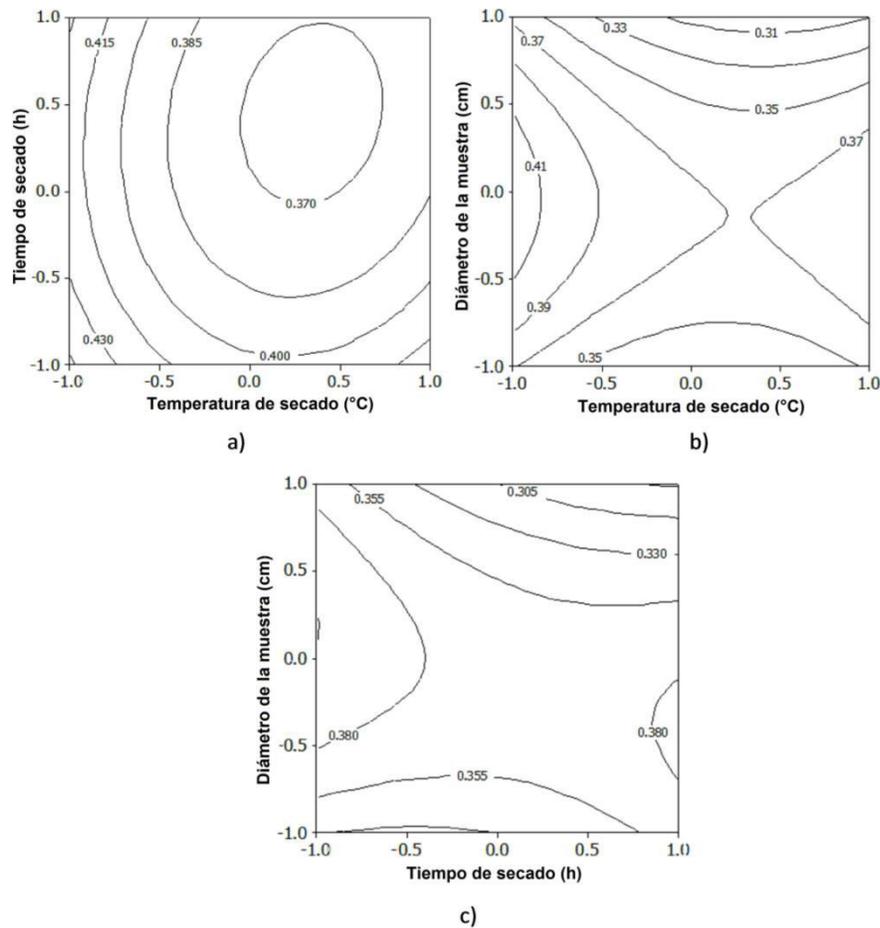


Figura 3.15 Gráficas de contornos de a_w en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra.

3.3.4.2 Humedad

En la Figura 3.16a se muestra que el menor contenido de humedad (menor a 0.008 gH₂O/ g s.s.) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a 58.25 °C (valores codificados de -1 y -0.45) y un tiempo de secado de 6.7 a 8 h (Valores codificados de 0.35 y 1). Así mismo, en la Figura 3.16b se observa que la región que presentó el menor contenido de humedad (menor a 0.0072 gH₂O/ g s.s.) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a 66.5 °C (valores codificados de -1 y 0.1) y un diámetro de muestra de 2.75 a 3 cm (Valores codificados de 0.75 y 1). Por último en la Figura 3.16c se observa que la región que presentó el menor contenido de humedad (menor a 0.008 gH₂O/ g s.s.) se obtuvo a un tiempo de secado de 4.9 a 7.6

h (valores codificados de -0.55 y 0.8) y un diámetro de muestra de 2.4 a 3 cm (Valores codificados de 0.4 y 1).

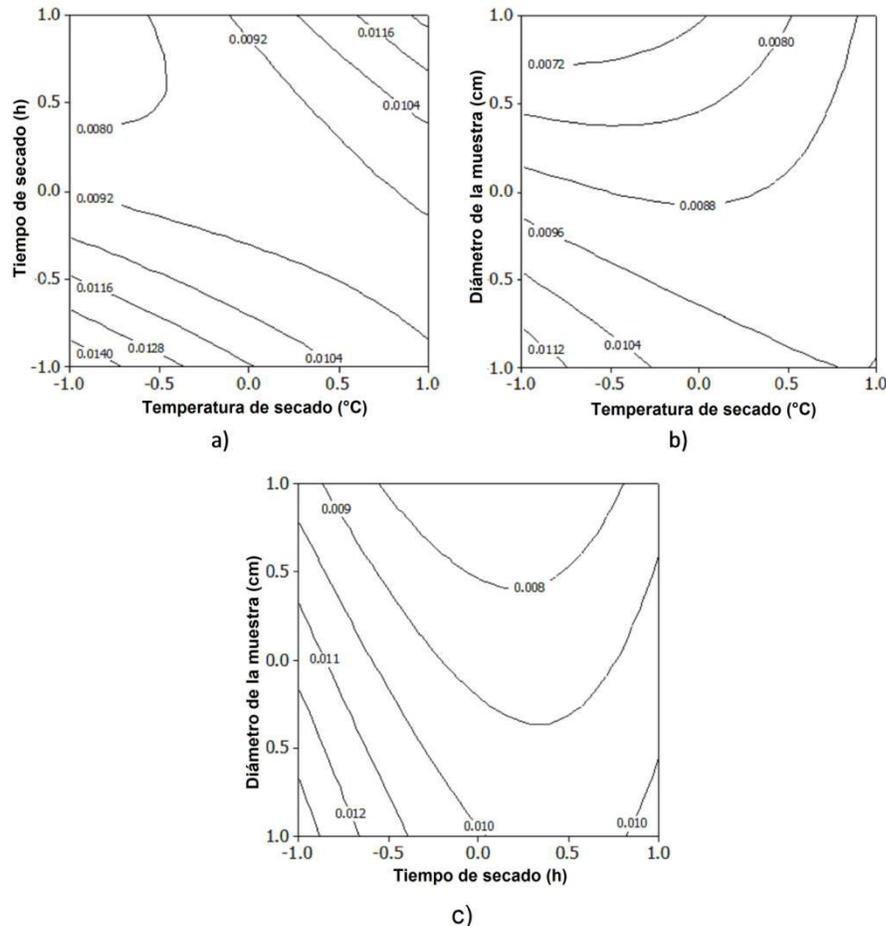


Figura 3.16 Gráficas de contornos de X en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra.

3.3.4.3 Diferencia total de color

En la Figura 3.17a se aprecia que la región que presentó la menor diferencia total de color (ΔE) (menor a 9.5) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a 51.5 °C (valores codificados de -1 y -0.90) y un tiempo de secado de 6.5 a 8 h (Valores codificados de 0.25 y 1). En la Figura 3.17b se observa que la región que presentó la menor ΔE (menor a 9) se obtuvo en un intervalo de temperatura de secado de 50 a 52.25 °C (valores codificados de -1 y -0.85) y un diámetro de muestra de 2.4 a 3 cm

(Valores codificados de 0.40 y 1). Mientras que en la Figura 3.17c se observa que la región que presentó el menor contenido de humedad (menor a 13) se obtuvo a un tiempo de secado de 7.4 a 8 h (valores codificados de 0.7 y 1) y un diámetro de muestra de 1 a 1.725 cm (Valores codificados de -1 y -0.27).

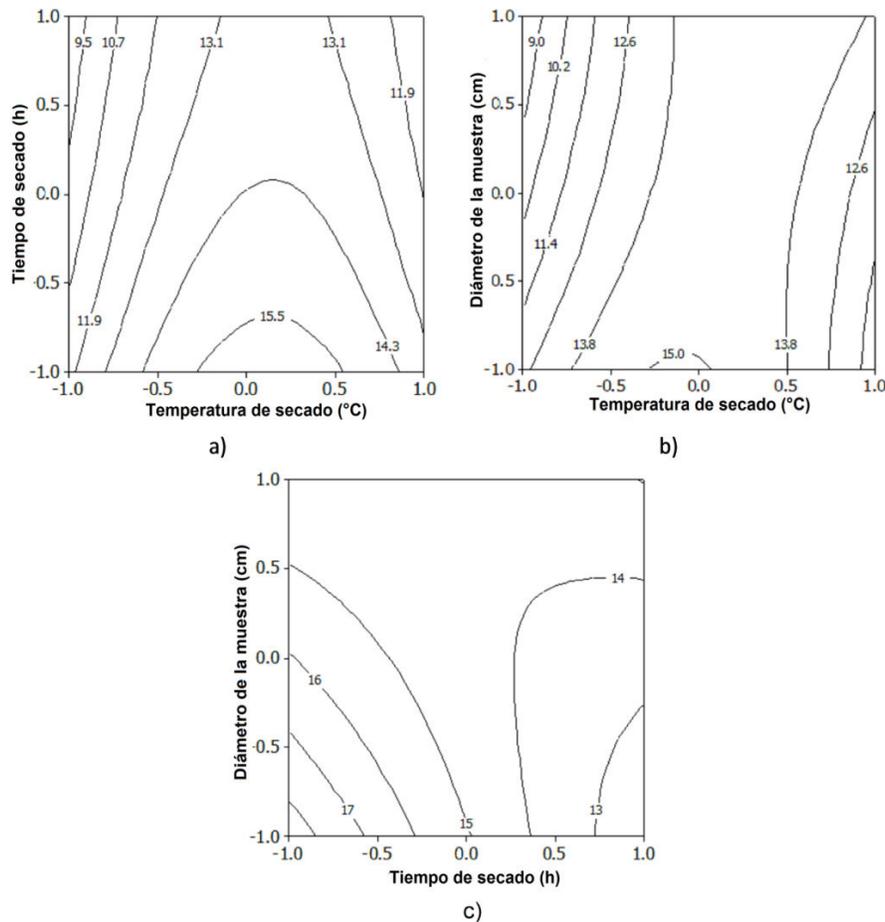


Figura 3.17 Gráficas de contornos de ΔE en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra.

3.3.4.4 Producción

En la Figura 3.18a se observa que la región donde se obtuvo la mayor producción de ciruela deshidratada (mayor a $0.010 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (valores codificados de -1 y 1) con un tiempo de secado de 4 a 4.3 h (Valores codificados de -1 y -0.75). Así mismo, la Figura 3.18b se observa la mayor

producción (mayor a $0.00757 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a 56 °C (valores codificados de -1 y -0.60) y un diámetro de muestra de 1 a 1.22 cm (Valores codificados de -1 y -0.78). En lo que se refiere a la Figura 3.18c se observa que la mayor producción (mayor a $0.010 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) se obtuvo a un tiempo de secado de 4.04 a 4.5 h (valores codificados de -0.98 y -0.75) y un diámetro de muestra de 1 a 3 cm (Valores codificados de -1 y 1).

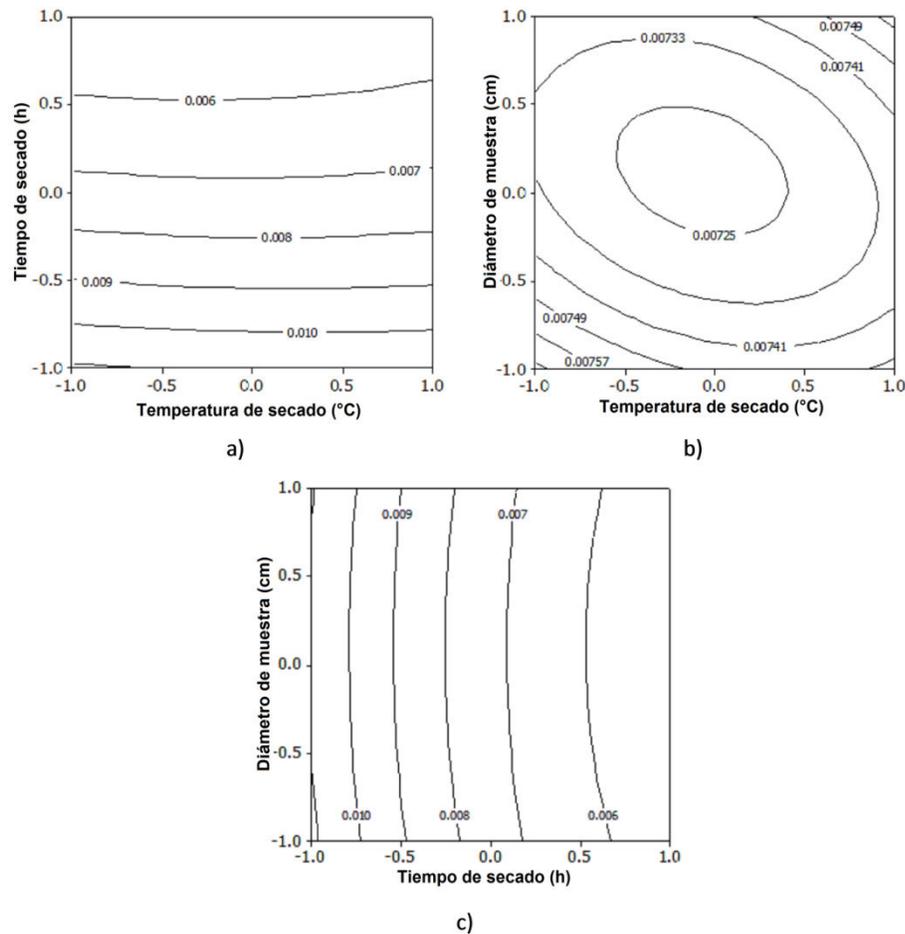


Figura 3.18 Gráficas de contornos de producción en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra.

3.3.4.5 Costo

Se puede apreciar en la Figura 3.19a que la región que presentó el menor costo (menor a $41.25 \text{ \$}\cdot\text{kg}^{-1}$) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a 54.5 °C (valores codificados de -1 y -0.70) y un tiempo de secado de 4 a 4.8 h (Valores

codificados de -1 y -0.60). En lo que se refiere a la Figura 3.19b se observa que la región que presentó el menor costo (menor a $40.50 \text{ \$}\cdot\text{kg}^{-1}$) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a 59 °C (valores codificados de -1 y -0.40) y un diámetro de muestra de 1 a 1.20 cm (Valores codificados de -1 y -0.80). Por último, en la Figura 3.19c se observa que el menor costo (menor a $40.80 \text{ \$}\cdot\text{kg}^{-1}$) se obtuvo a un tiempo de secado de 4 a 8 h (valores codificados de -1 y 1) y un diámetro de muestra de 1 a 1.1 cm (Valores codificados de -1 y -0.9).

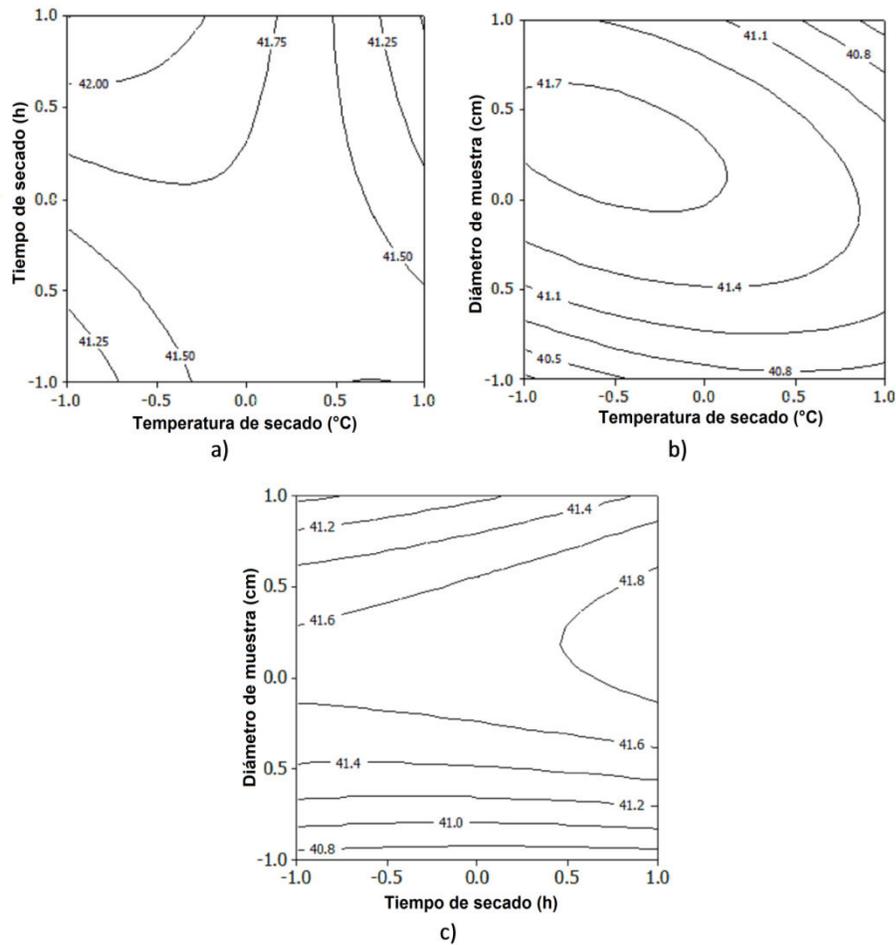


Figura 3.19 Gráficas de contornos de costo en función de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra.

3.3.5 Gráficas de superposición de contornos

Las condiciones óptimas de secado pueden ser determinadas a partir de la región que se deriva al superponer dos graficas de contorno de dos variables independientes, mientras que la otra variable se mantiene constante. Esta técnica da la región de operación (condiciones de secado) para predeterminadas respuestas (Theppaya y Prasertsan, 2004).

En la Tabla 3.7 se presenta los valores descritos anteriormente (sección 3.3.4), los cuales fueron empleados para elaborar las gráficas de superposición de contornos para las variables de respuesta: humedad, actividad de agua, diferencia total de color, producción y costo como función de la temperatura de secado (x_1), tiempo de secado (x_2) y diámetro de la muestra (x_3).

Tabla 3.7 Puntos óptimos de operación para el secado por charolas de ciruela.

Variables de respuesta	Combinación de factores					
	x_1x_2		x_1x_3		x_2x_3	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
a_w	0.37	0.55	0.35	0.55	0.30	0.55
X (gH ₂ O/ g s.s.)	0.008	0.10	0.0065	0.10	0.008	0.10
ΔE	9.5	16.1	9.0	16.1	13.0	16.1
Producción (kg·h ⁻¹)	0.0054	0.01	0.0054	0.01	0.01	0.01
Costo (\$·kg ⁻¹)	41.52	43.5	40.50	43.5	40.8	43.5

El principal criterio para la optimización de las restricciones fue el mínimo contenido de actividad de agua y humedad, la mínima diferencia total de color, la máxima producción y el menor costo. Estas restricciones dieron como resultado una “zona factible” de las soluciones optimas (área blanca en los diagramas de contorno superpuestos).

En la Figura 3.20a se presenta la región factible en función de la temperatura de secado y tiempo de secado con diámetro de muestra igual a cero. La región obtenida cumple con las restricciones descritas en la sección 2.9. De acuerdo con los resultados proporcionados por el Software Minitab 10, las coordenadas

correspondientes al punto óptimo fueron: temperatura de secado de 52.42 °C y tiempo de secado 4.52 h (Valores codificados de -0.8383 y -0.7373, Figura 3.20b).

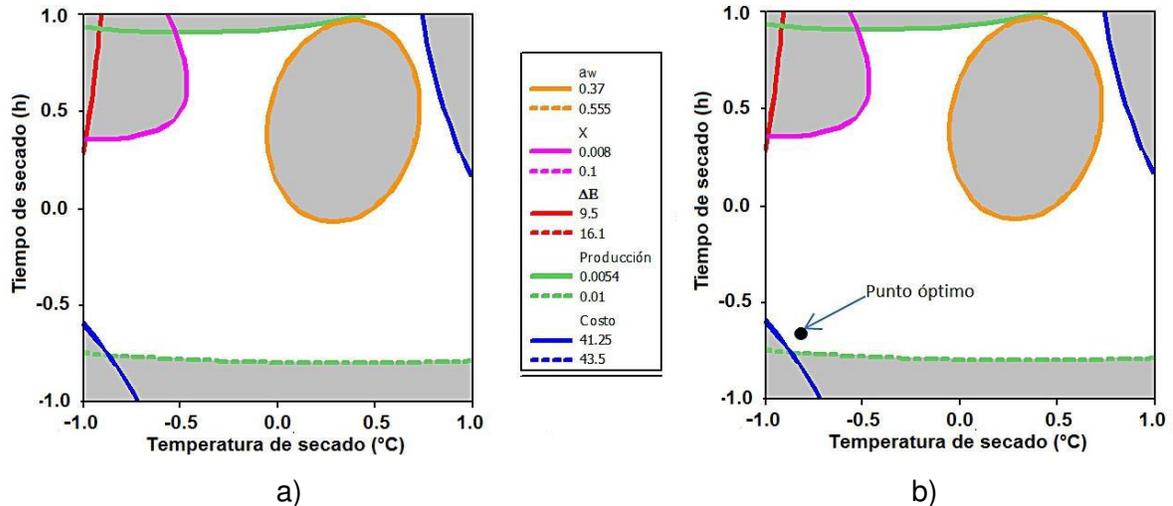


Figura 3.20 Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de secado y tiempo de secado.

En la gráfica (Figura 3.21a) se muestra la superposición de contornos en función de la temperatura de secado y el diámetro de la muestra con el tiempo de secado como una constante (codificado igual a cero).

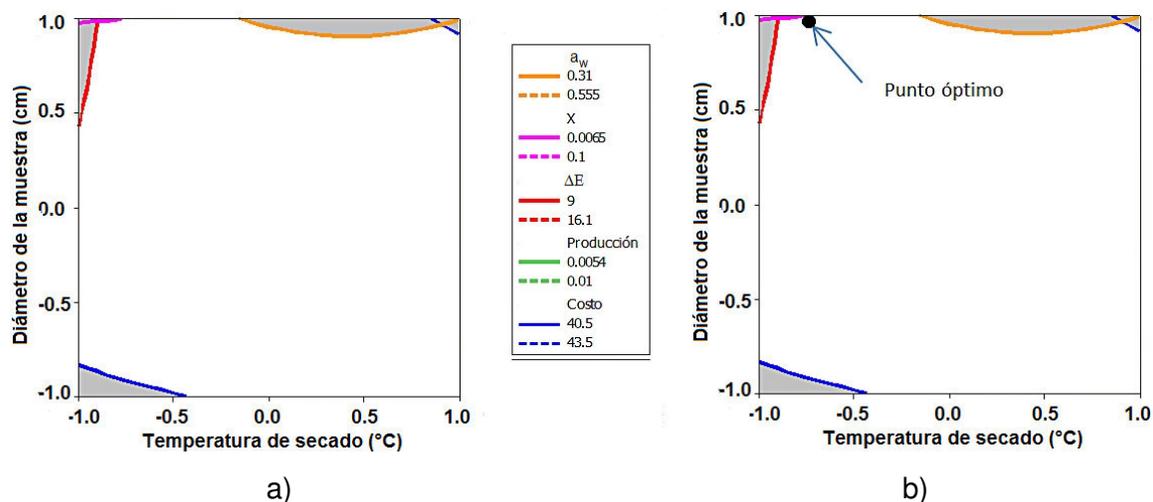


Figura 3.21 Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de secado y diámetro de la muestra.

Los puntos óptimos obtenidos mediante el software Minitab 10 fueron: una temperatura de secado de 51.51 °C y un diámetro de muestra de 3 cm (valores codificados de -0.8989 y 1, Figura 3.21b).

Finalmente, en la Figura 3.22a se observa la región factible obtenida por la superposición de los gráficos de contornos en función del tiempo de secado y diámetro de la muestra. Los resultados obtenidos por el software Minitab 10 indican que el punto óptimo se obtiene con valores de tiempo de secado de 4.48 h y un diámetro de muestra de 3 cm (valores codificados de -0.7575 y 1, Figura 3.22b)

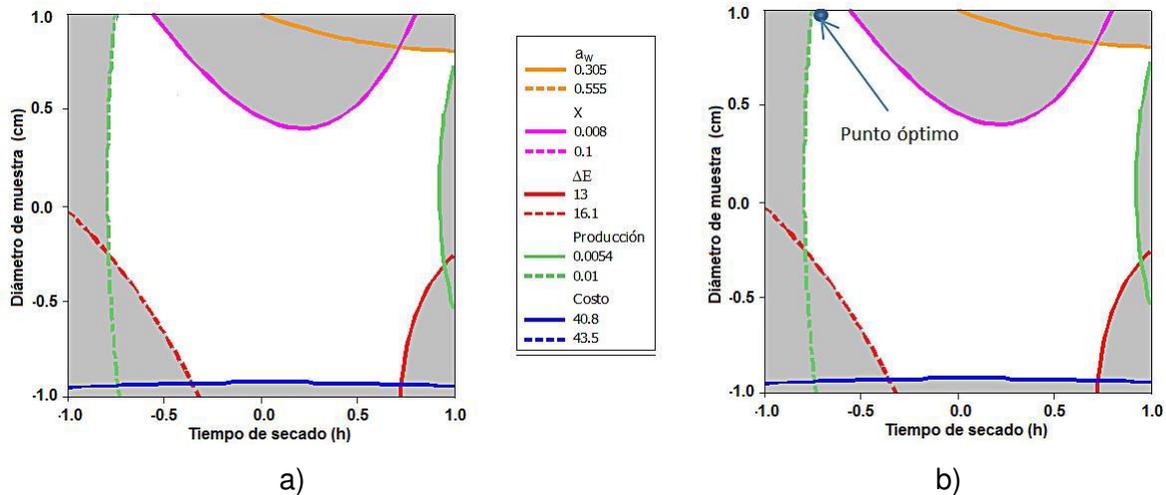


Figura 3.22 Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tiempo de secado y diámetro de la muestra.

A partir de los resultados obtenidos de la superposición de contornos se obtuvieron las regiones óptimas para el proceso de secado por charolas de ciruela mexicana (betabel) las cuales fueron: una temperatura de secado de 51.51 a 52.42 °C un tiempo de secado de 4.48 a 4.52 h y un diámetro de muestra de 3 cm. Posteriormente se buscó la mejor combinación de las regiones óptimas obteniéndose los siguientes puntos: temperatura de secado de 54.75 °C, tiempo de secado de 4.5 h y diámetro de muestra de 3 cm; los cuales corresponden a los valores codificados de: -0.6835, -0.7441 y 1, respectivamente; estos valores fueron sustituidos en los

modelos de segundo orden descritos en la sección 3.3.3 para obtener los valores óptimos de las variables de respuesta.

3.3.6 Validación de los puntos óptimos

La validación de los puntos óptimos se llevó a cabo de acuerdo a lo descrito en la sección 2.10. Para lo cual se realizaron las corridas experimentales a las condiciones óptimas. Además, se calculó el error relativo empleando la ecuación 2.19. En la tabla 3.8 se presentan los resultados experimentales obtenidos para el secado por charolas de ciruela mexicana (betabel).

Tabla 3.8 Respuestas óptimas del proceso de secado por charolas de ciruela.

Condiciones de operación	Parámetros	Respuestas óptimas	Respuestas experimentales	Error relativo
Temperatura de secado= 55 °C Tiempo de secado = 4.5 h Diámetro de la muestra= 3 cm	a_w	0.3785	0.346	9.07
	X (g H ₂ O/g s.s.)	0.0086	0.0085	1.17
	ΔE	10.6513	12.48	14.65
	Producción (kg/h)	0.00999	0.01045	4.40
	Costo total (\$·kg ⁻¹)	40.9962	40.40861	1.45

Para el caso de la humedad y la actividad de agua el error fue debido a que se obtuvo un menor contenido de humedad y actividad de agua al validar las condiciones de secado. Para el caso de la diferencia total de color (Figura 3.23) el error fue debido a que se obtuvo una mayor diferencia con respecto a las condiciones óptimas. La ciruela deshidratada bajo las condiciones óptimas al ser comparada con el fruto fresco presentó un ligero incremento en la luminosidad ($L=17.48$) y un decremento en la rojez ($a=10.12$) (Figura 3.23). Finalmente, se observa que el error de en la producción y el costo se deben a un aumento en la producción, lo que afectó al costo final obteniéndose un valor menor al óptimo esperado. En los diferentes casos, el error implicó una mejora en el proceso de secado por charolas de ciruela, ya que se obtuvo un producto de mayor calidad en términos de humedad y costo.

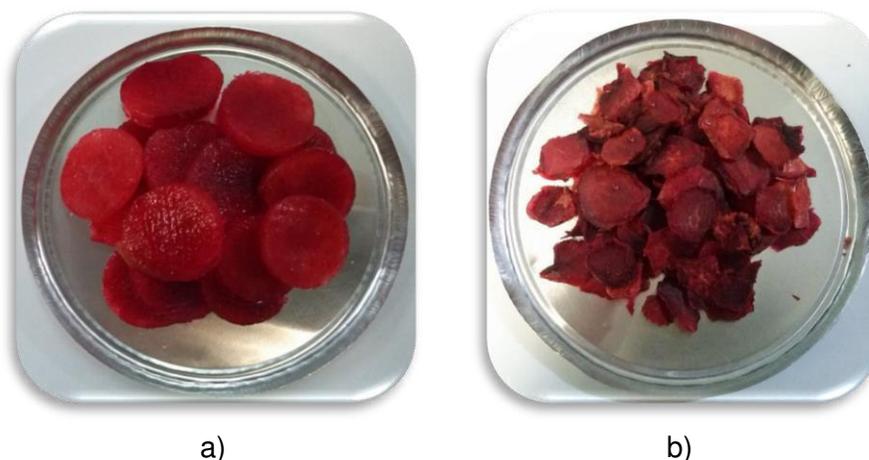


Figura 3.23 Comparación de muestras frescas (a) y muestras deshidratadas (b) de ciruela a las condiciones óptimas.

3.3.6.1 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela deshidratada

Se realizó el análisis del contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de las muestras procedentes de la validación de los puntos óptimos; con la finalidad de verificar si hubo una degradación de estos componentes. En la Tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos de estos parámetros.

Tabla 3.9 Resultados para el contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de ciruela deshidratada.

Parámetro	
Pectina (%)	2.3337 ^{0.3694}
Ácido ascórbico (mg/100g)	18.503 ^{0.673}
Ácido cítrico (%)	1.6140 ^{1.1156}

Se observó un ligero decremento en el contenido de pectina en comparación con el fruto fresco; sin embargo, se observó una buena retención de ácido ascórbico y ácido cítrico de las rodajas de ciruela deshidratadas empleando las condiciones óptimas de secado. Resultados similares fueron reportados por Erbay e Icier (2009) para la optimización de hojas de oliva. Los investigadores observaron que las temperaturas entre 48 - 55 °C y una reducción en el tiempo de procesamiento ayudan a minimizar la pérdida de las propiedades antioxidantes de los alimentos deshidratados.

. 3.4 Liofilización de ciruela mexicana

La preservación de productos biológicos por reducción de contenido de agua puede ser lograda por diferentes técnicas de deshidratación, la liofilización surge como un método de secado alternativo, capaz de generar productos de alta calidad con bajo contenido de humedad, buenas propiedades nutricionales y alta capacidad de rehidratación, el cual reduce la degradación del producto en comparación con las técnicas clásicas de secado

Como parte de esta investigación se evaluó el proceso de liofilización de la ciruela mexicana, ecotipo betabel, para lo cual se empleó la metodología mencionada en la sección 2.4.2, al igual que en el proceso de secado por charolas, se determinaron como variables de respuesta: la actividad de agua, humedad, color, contenido de pectina, ácido ascórbico, ácido cítrico y las propiedades térmicas del fruto (conductividad térmica y calor específico).

3.4.1 Curvas de actividad de agua de la ciruela durante el proceso de liofilización

La actividad de agua (a_w), como se ha mencionado anteriormente, es considerada uno de factores de calidad más importante para los productos secos; por lo tanto se evaluó la evolución de la a_w de la ciruela durante el proceso de liofilización.

En la Figura 3.24 se puede observar que las curvas de a_w presentan un decremento a lo largo del tiempo de procesamiento. De acuerdo al análisis estadístico (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$) las rodajas de ciruela congeladas a -60 °C presentaron un decremento significativo de la a_w a partir de los 120 min para las muestras de 1 cm de diámetro (Exp 1 y 2) en comparación con las muestras de 2 y 3 cm de diámetro, que presentaron una disminución de a_w a partir de los 180 y 240 min, respectivamente. Con respecto a las muestras congeladas a una temperatura de -40 °C, la depresión de la a_w inicia a los 180 min para los diferentes diámetros de rodaja empleados. En el caso de las rodajas congeladas a -20 °C, la actividad de agua

empieza a disminuir a partir de los 180 min para las rodajas de menor tamaño (1 y 2 cm) y a los 240 min para las rodajas de 3 cm de diámetro (Exp 7 y 8).

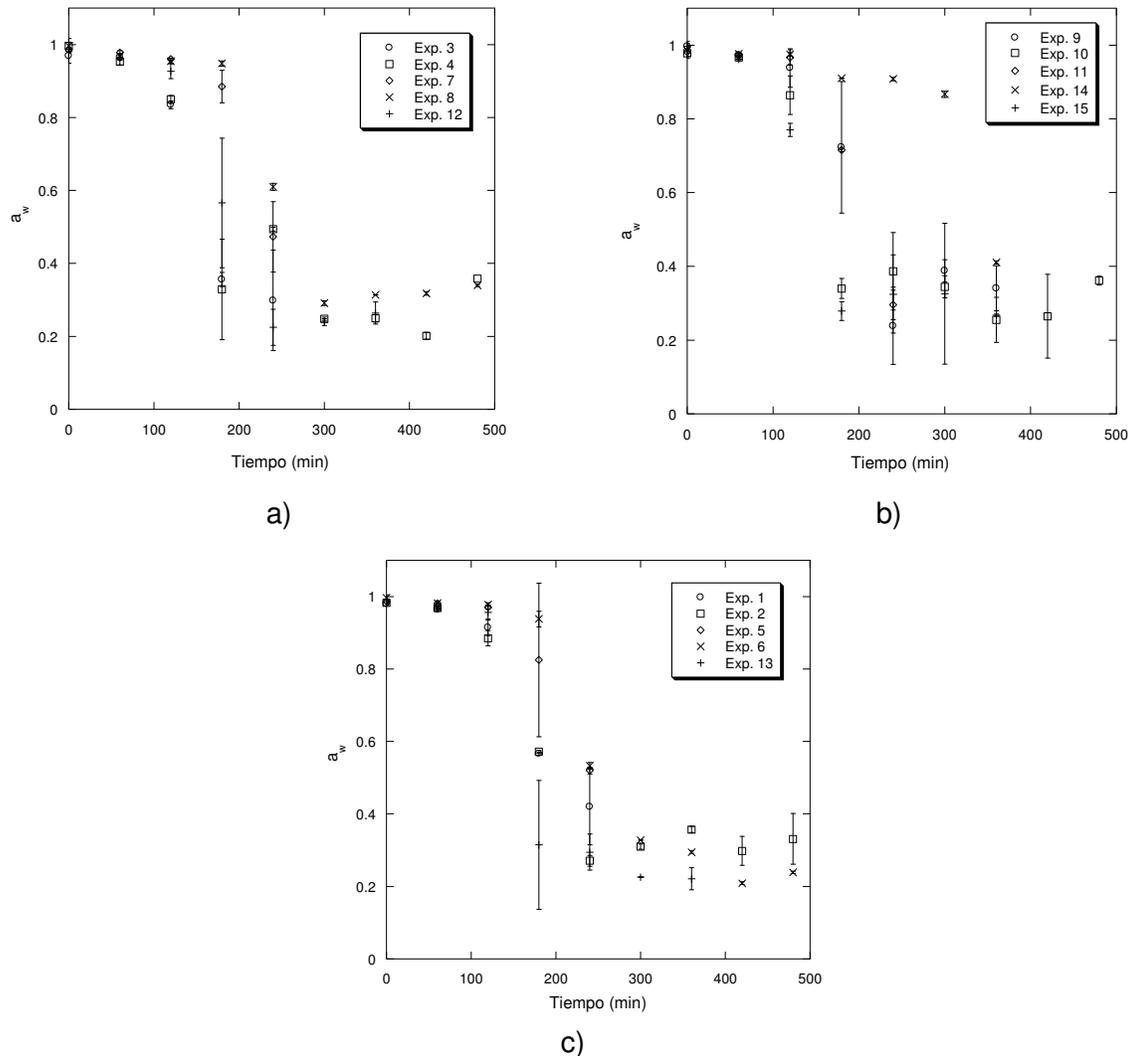


Figura 3.24 Evolución de la a_w de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

En general, se observó que todas las rodajas de ciruela a partir de los 240 min de su procesamiento alcanzaron una a_w menor a 0.6, lo anterior indica que el producto obtenido es estable y que no habrá crecimiento bacteriano; estos valores son similares a los obtenidos para la liofilización de rodajas de manzana y kiwi (Li *et al.*, 2014; Ergün *et al.*, 2016) y de piezas de marolo y setas (Corrêa *et al.*, 2011; Jaworska *et al.*, 2014).

3.4.2 Curvas de evolución de humedad de la ciruela durante el proceso de liofilización

Las curvas de la evolución del contenido de humedad (X) de las rodajas de ciruela liofilizada tienen un comportamiento similar, en las cuales la humedad decrece continuamente durante el tiempo de liofilización (Figura 3.25).

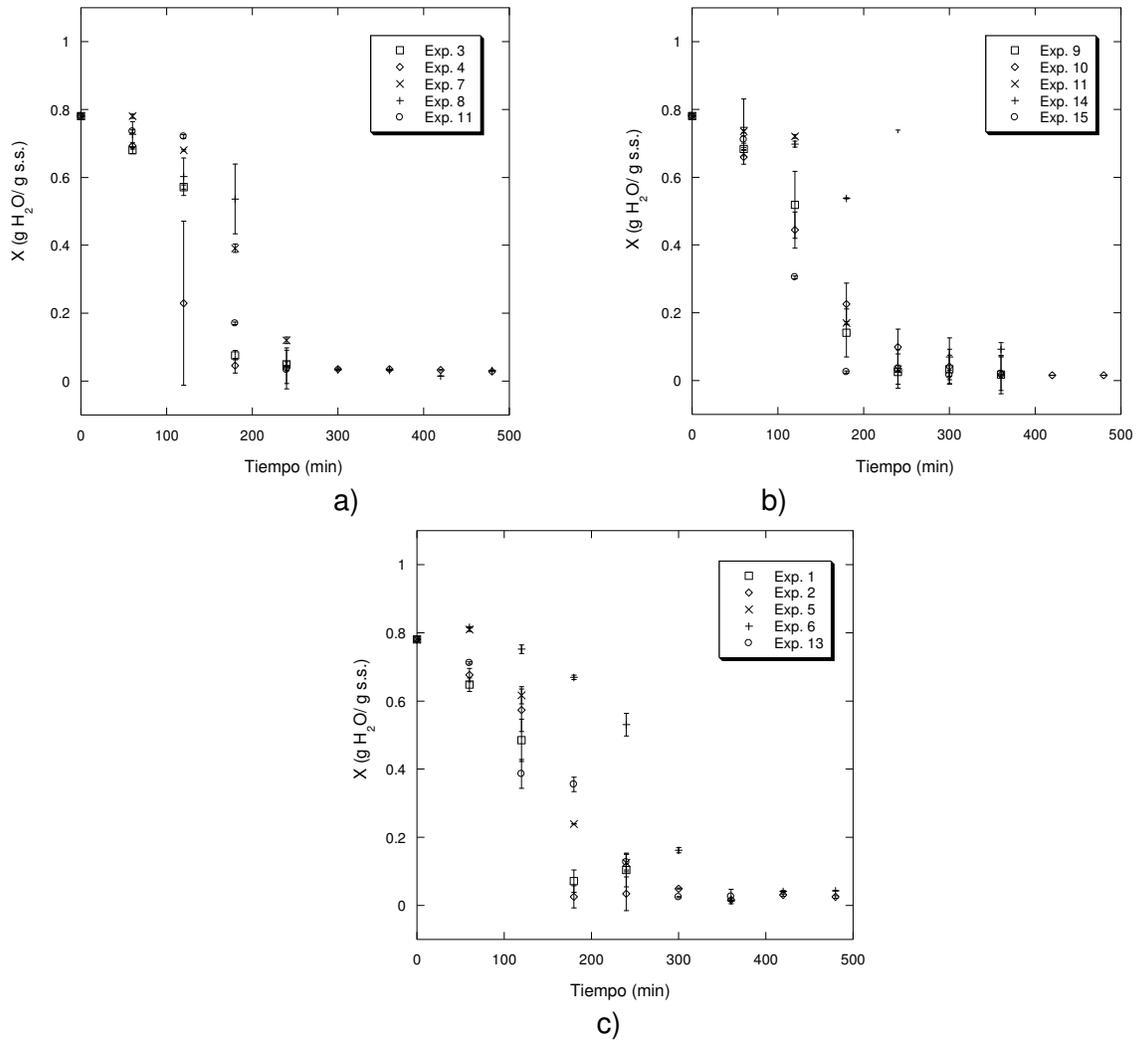


Figura 3.25 Evolución de la humedad de la ciruela durante el proceso de liofilización:

a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

Para las diferentes condiciones evaluadas, se presentaron dos periodos de aceleración y desaceleración, donde hubo una pérdida de humedad rápida y lenta, respectivamente. De acuerdo a Pei *et al.* (2014), el periodo de aceleración puede

atribuirse a una mayor área de sublimación durante la primera etapa del secado, la cual al continuar con el proceso se reduce gradualmente, lo cual produce una mayor resistencia en la transferencia de masa.

Los resultados experimentales de las rodajas de ciruela pretratadas a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicaron que la mayor pérdida de humedad se da a partir de los 120 min para las rodajas de 1 y 2 cm, mientras que para las rodajas de mayor diámetro (3 cm) el decremento de la humedad se presentó a partir de los 180 min de procesamiento (Exp 5 y 6). En las rodajas de ciruela pretratadas a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ el decremento en el contenido de humedad se presenta a partir de los 120 min para los diferentes diámetros de muestra empleados (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$).

Las muestras congeladas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ presentaron un comportamiento similar a las muestras congeladas a la menor temperatura ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$); en las cuales la disminución de la humedad de las muestras se da a partir de los 120 min para las rodajas de menor diámetro (1 y 2 cm) y 180 min para las rodajas de mayor diámetro (3 cm).

Se observó que para los diferentes diámetros de muestra liofilizado el empleo de tiempos prolongados de procesamiento (6 y 8 h), da lugar a una mayor remoción de agua; y por lo tanto, un menor contenido de humedad al final del proceso (menor a $0.10\text{ g H}_2\text{O/ g s.s.}$); sin embargo, en el tratamiento donde se empleó un diámetro de muestra de 3 cm y un tiempo de procesamiento de 4 h (Exp. 7) se tienen valores de humedad cercanos a $0.10\text{ g H}_2\text{O/ g s.s.}$ lo cual no garantiza la estabilidad del alimento (Henríquez *et al.*, 2013).

3.4.3 Color de la ciruela durante el proceso de liofilización

La conservación del color es considerado un indicador de la calidad en las frutas deshidratadas. En el caso de las frutas liofilizadas la retención de los colores rojo y amarillo es mejor en comparación con los métodos tradicionales donde se produce un pardeamiento enzimático durante el secado (Serna-Cock *et al.*, 2015).

Por lo anterior, uno de los objetivos de esta investigación fue examinar la influencia de la liofilización sobre el color de la ciruela mexicana (betabel). Los valores de color inicial de la ciruela fresca fueron $L=16.24$, $a=16.69$ y $b=4.97$.

3.4.3.1 Parámetro de color L

Las rodajas de ciruela liofilizadas bajo las diferentes condiciones de proceso (Figura 3.26) presentaron un aumento de luminosidad comparadas con el alimento fresco; este fenómeno es atribuido a la congelación inicial (velocidad de congelación y temperatura) y al efecto de la reducción de agua (Hammami y René, 1997).

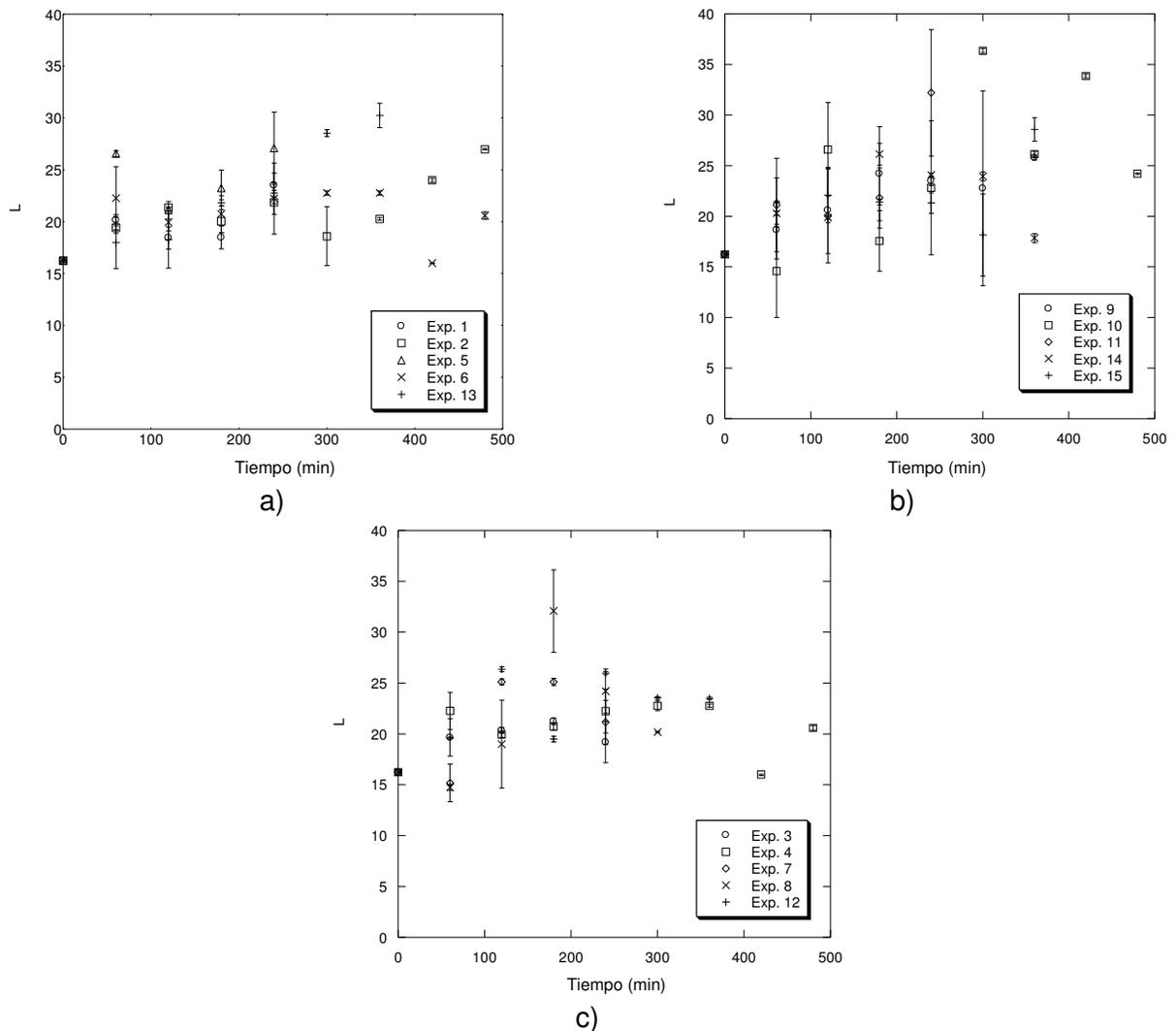


Figura 3.26 Evolución del color (parámetro L) de la ciruela durante el proceso de liofilización:

a) -60 °C, b)- 40°C y- 20 °C.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó un aumento de la luminosidad a partir de los 120 min de liofilización para los diferentes diámetros de muestra empleados (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$); presentándose las mayores variaciones de luminosidad al emplear las temperaturas de congelación de -60 y -40 °C en comparación con las muestras que fueron congeladas a una temperatura de -20 °C. En diversos estudios realizados a alimentos liofilizados se han encontrado resultados similares donde la temperatura de congelación, tiene un marcado efecto sobre la luminosidad de las muestras, los materiales congelados rápidamente conservan un color más luminoso a diferencia de aquellos donde la congelación fue más lenta (Chin y Law, 2010; Caparino *et al.*, 2012; Serna-Cock *et al.*, 2015).

3.4.3.2 Parámetro de color a

Las curvas de la evolución del parámetro **a** de las rodajas de ciruela liofilizada bajo los diferentes tratamientos realizados se muestran en la Figura 3.27. Los valores obtenidos fueron comparados con muestras frescas de ciruela, las cuales fueron empleadas como estándar.

Tomando en cuenta el valor inicial del parámetro **a** para las rodajas de ciruela que fue de 16.69, se observó que durante el proceso se presentaron variaciones hasta de 7 unidades (Exp 11). Sin embargo, el análisis estadístico (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$) indicó que los valores de **a** para las diferentes condiciones empleadas se mantuvieron estables durante el procesamiento, esto es debido a que en este tipo de secado no se emplean altas temperaturas, las cuales están relacionadas con la degradación de pigmentos.

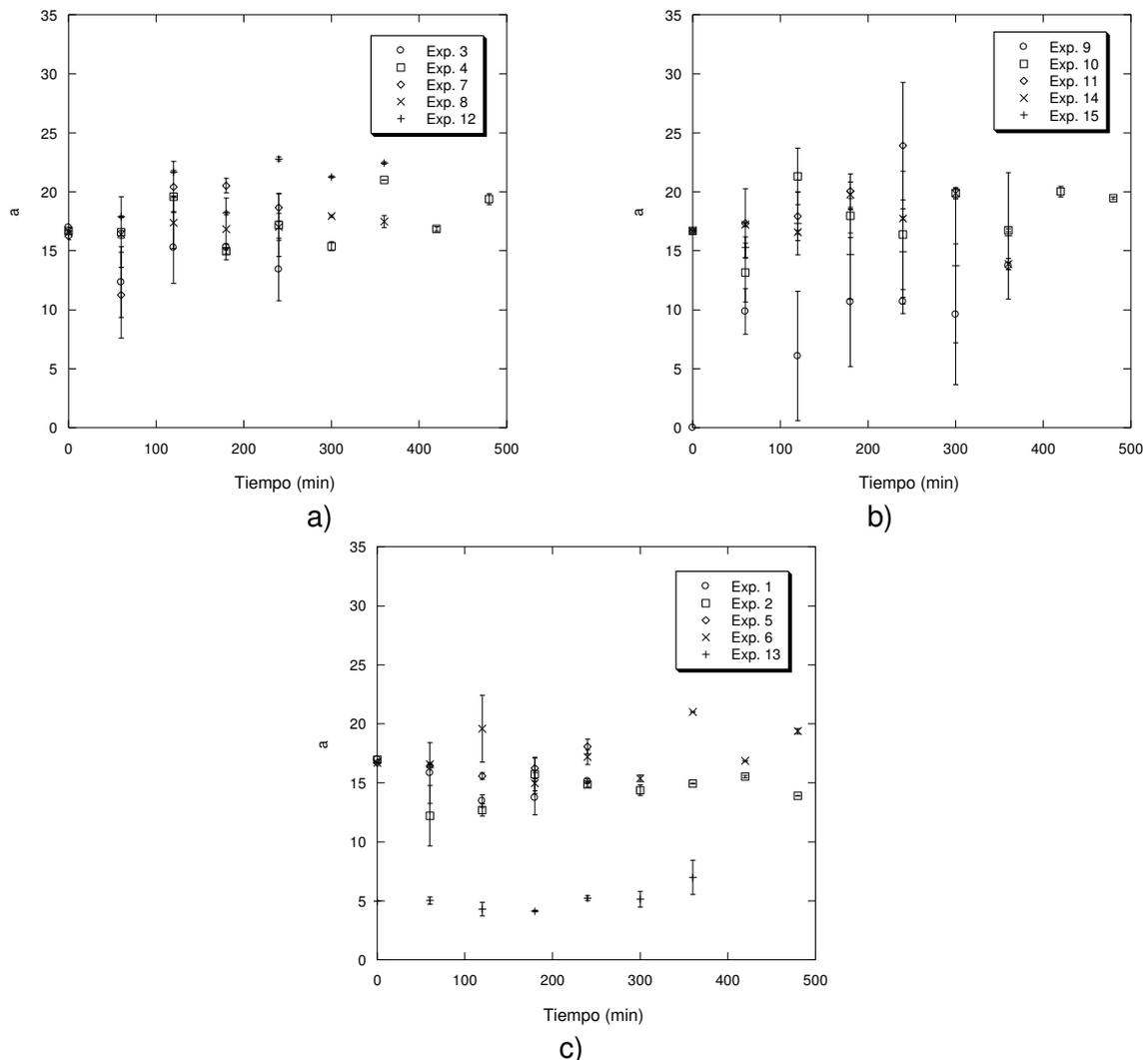


Figura 3.27 Evolución del color (parámetro **a**) de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

Además, Shishegarha *et al.* (2002) mencionan que el color de las antocianinas varía con respecto a los cambios de pH causados por el proceso de congelación. Por lo tanto, una disminución en el pH durante la liofilización puede cambiar el equilibrio de las antocianinas, lo que puede aumentar la intensidad del color rojo. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Beaudry *et al.* (2004) y Franceschinis *et al.* (2015) para la liofilización de arándanos y cerezas, quienes observaron que los frutos procesados mediante la liofilización presentaron una mayor tonalidad roja debido a la

preservación de los pigmentos de antocianinas en comparación con los tratamientos térmicos que pueden producir oxidación, lo que resulta en degradación del color.

3.4.3.3 Parámetro de color b

En la Figura 3.28 se presentan los resultados de la evolución de parámetro de color **b** de las muestras para los diferentes experimentos realizados. El parámetro **b** no presentó diferencias significativas (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$) a lo largo del proceso de liofilización de ciruela.

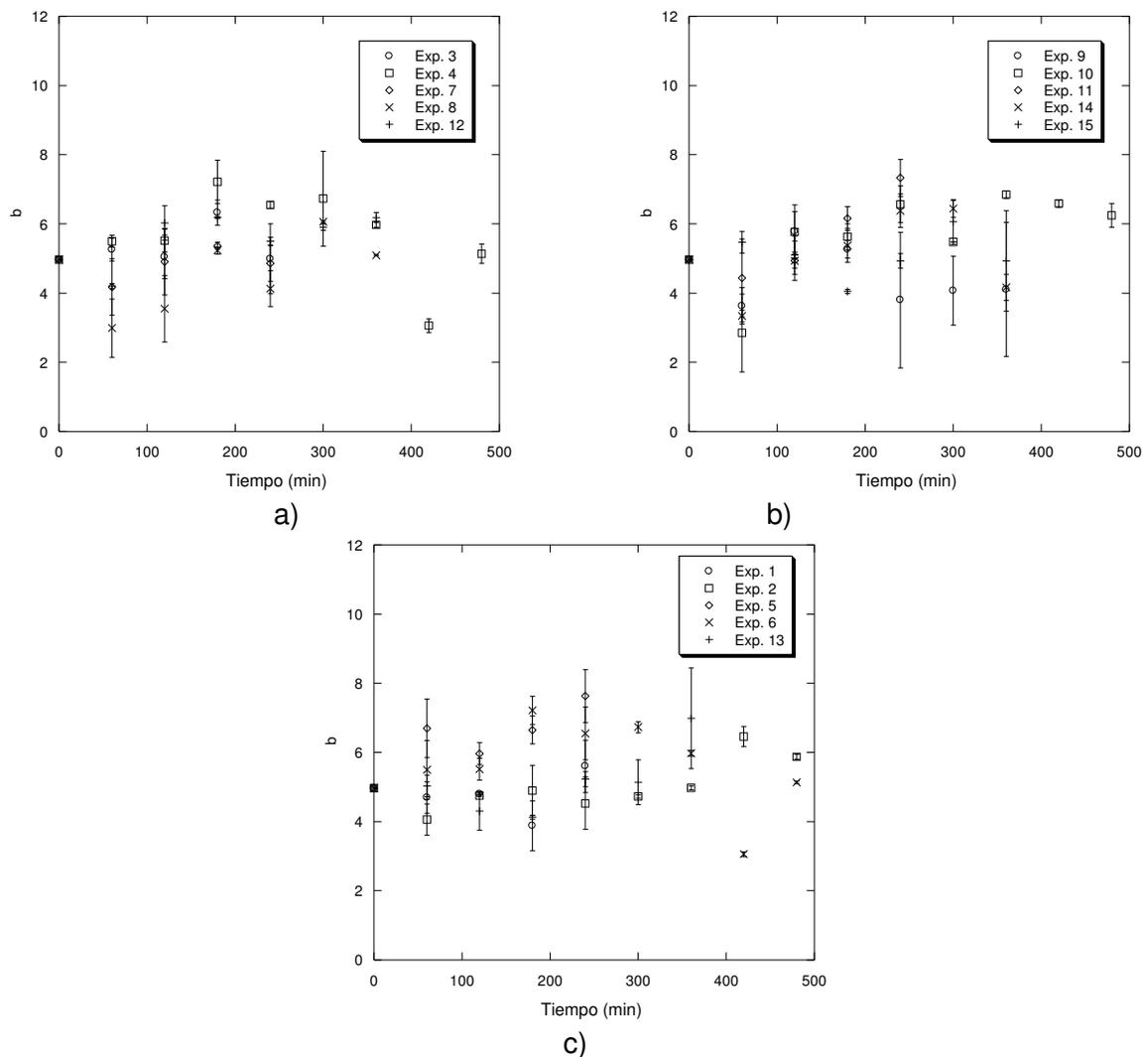


Figura 3.28 Evolución del color (parámetro b) de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, -40 °C y -20 °C.

3.4.3.4 Diferencia total de color ΔE

A partir de los resultados obtenidos de los parámetros de color **L**, **a** y **b** se evaluó la diferencia de color (ΔE) de las rodajas de ciruela liofilizada (Figura 3.29), la cual indica la variación total de color con respecto al color de la muestra fresca (estándar).

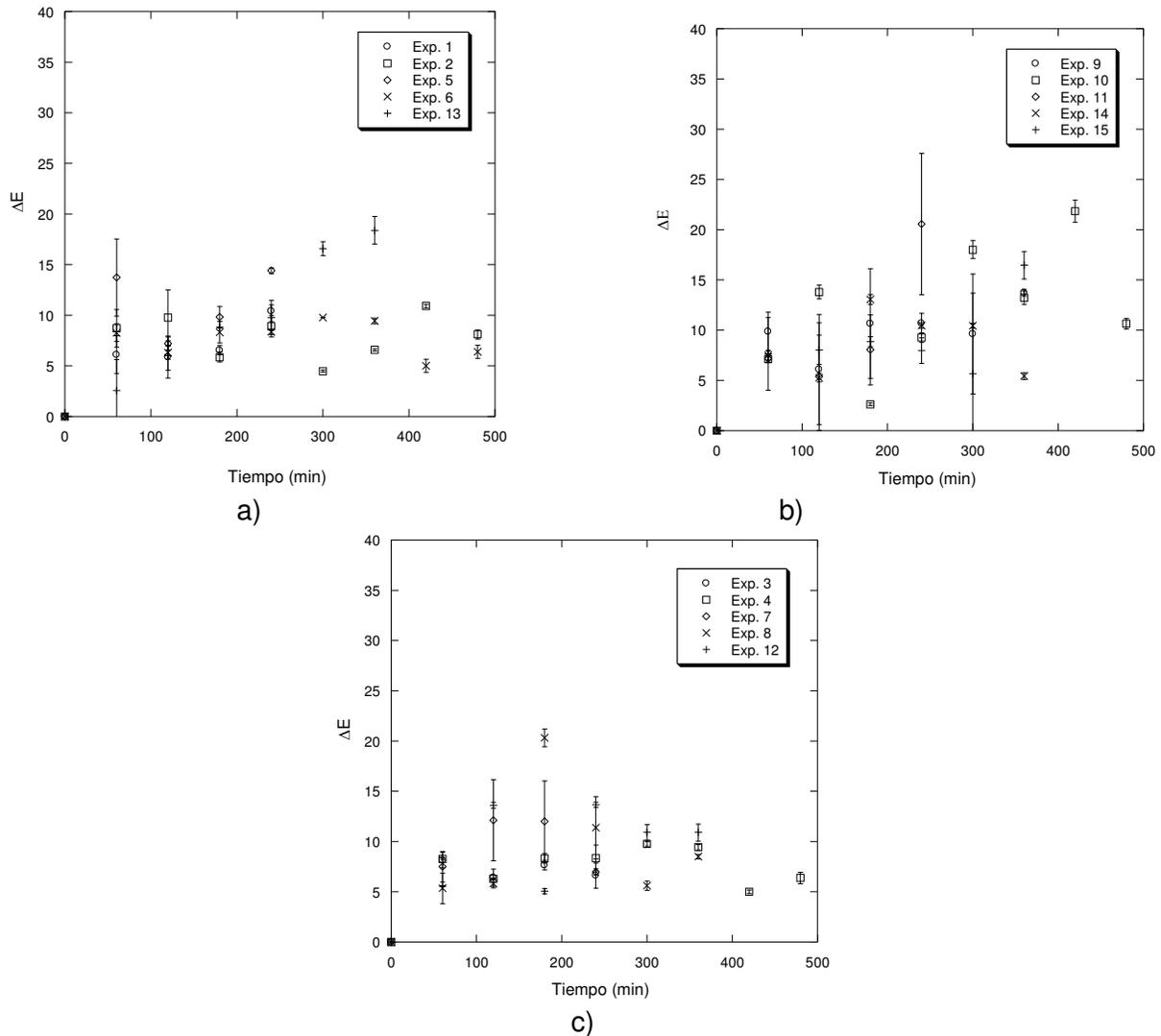


Figura 3.29 Evolución en la diferencia total de color (ΔE) de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y -20 °C.

En el análisis de color de los alimentos deshidratados se prefieren los productos cuyo color sea cercano al color original de la muestra fresca, por lo tanto valores mayores de ΔE indican una mayor variación de color con respecto al material fresco (Lozano-

Acevedo *et al.*, 2011). El proceso de liofilización tuvo un efecto sobre la diferencia total de color, debido principalmente a que las muestras presentaron una mayor luminosidad comparadas con el estándar (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$).

Los resultados obtenidos son consistentes con los datos reportados en literatura para frutas liofilizadas (Beaudry *et al.*, 2004; Chin y Law, 2010; Ergün *et al.*, 2016). Reyes *et al.* (2008) menciona que el cambio total de color de las muestras liofilizadas es más alto cuando es comparado con los frutos frescos y con las muestras deshidratadas mediante métodos convectivos de secado, debido a los cambios de luminosidad y el bajo pardeamiento de las muestras liofilizadas.

3.4.3.5 Color final de las rodajas de ciruela liofilizada

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados finales de los parámetros de color de la ciruela mexicana al final del proceso de liofilización.

Tabla 3.10 Resultados experimentales de los parámetros de color las rodajas de ciruela liofilizada.

Exp.	L	a	b	ΔE
1	23.51 ^{1.16}	15.15 ^{0.19}	5.60 ^{0.75}	10.41 ^{0.47}
2	20.99 ^{0.08}	13.90 ^{0.11}	5.80 ^{0.07}	8.11 ^{0.00}
3	19.19 ^{2.15}	13.41 ^{2.67}	4.99 ^{1.10}	6.61 ^{1.23}
4	20.59 ^{0.19}	19.38 ^{0.42}	5.14 ^{0.28}	6.38 ^{0.05}
5	27.09 ^{3.43}	18.08 ^{0.62}	7.63 ^{0.76}	14.14 ^{4.27}
6	21.56 ^{0.13}	16.35 ^{0.21}	6.00 ^{0.03}	7.81 ^{0.06}
7	21.14 ^{2.17}	18.66 ^{1.15}	4.58 ^{0.51}	6.98 ^{3.11}
8	31.99 ^{0.07}	17.94 ^{0.02}	7.92 ^{0.01}	20.00 ^{0.02}
9	25.80 ^{0.24}	21.9 ^{3.69}	4.11 ^{1.93}	13.72 ^{0.34}
10	24.22 ^{0.11}	19.40 ^{0.03}	6.25 ^{0.03}	10.65 ^{0.35}
11	32.20 ^{6.62}	23.92 ^{5.22}	7.33 ^{0.53}	20.56 ^{7.99}
12	23.49 ^{0.12}	22.44 ^{0.09}	6.18 ^{0.01}	10.90 ^{0.08}
13	30.24 ^{1.16}	23.64 ^{5.35}	6.98 ^{1.45}	18.40 ^{1.37}
14	17.85 ^{0.09}	13.88 ^{0.03}	4.17 ^{0.03}	15.44 ^{0.00}
15	28.59 ^{1.16}	16.27 ^{5.35}	4.93 ^{1.45}	16.46 ^{1.37}

La diferencia total de color (ΔE) para los 15 tratamientos vario entre 6.38 y 20.56, no se encontró diferencia estadística significativa entre estos tratamientos (prueba de Tukey $\alpha=0.05$), esto a pesar de que la temperatura de congelación tuvo una mayor influencia sobre el color de las rodajas de ciruela liofilizada.

Las muestras congeladas a la menor temperatura (-60 °C) exhibe una mayor variación en los parámetros **L** y **a** (Exp. 11). Observaciones similares fueron reportadas en literatura para diversos vegetales, tubérculos y frutos liofilizados, los cuales adquirieron una mayor luminosidad al ser empleada una menor temperatura de congelación (Hawlder *et al.*, 2006; Jokic *et al.*, 2009; Reyes *et al.*, 2011). La temperatura de congelación tiene un marcado efecto en la luminosidad de las muestras liofilizadas; las muestras sometidas a una congelación rápida mantienen un color más brillante en comparación con las muestras congeladas lentamente (Ceballos *et al.*, 2012).

Las rodajas de ciruela betabel liofilizadas mostraron además de la variación de **L**, un incremento en el parámetro **a** (verde-rojo) lo que contribuye a un elevado ΔE y bajo pardeamiento (Chin y Law, 2010). De acuerdo a los resultados obtenidos, el parámetro **a** presentó un mayor incremento cuando se emplearon los diámetros de muestra de 2 y 3 cm. Esta última observación, es congruente con lo reportado por Caparino *et al.* (2012) quienes reportan que el aumento del tamaño de partícula da lugar a productos deshidratados con colores más intensos (vividios). Por otra parte, el análisis estadístico indicó que los factores de estudio no influyeron significativamente sobre el parámetro de color **b** (azul-amarillo).

En la Figura 3.30 se puede observar el color de las rodajas de ciruela al final del proceso de liofilización a las diferentes condiciones evaluadas, de igual manera se puede interpretar de una forma más clara lo descrito anteriormente con respecto al parámetro de color ΔE .

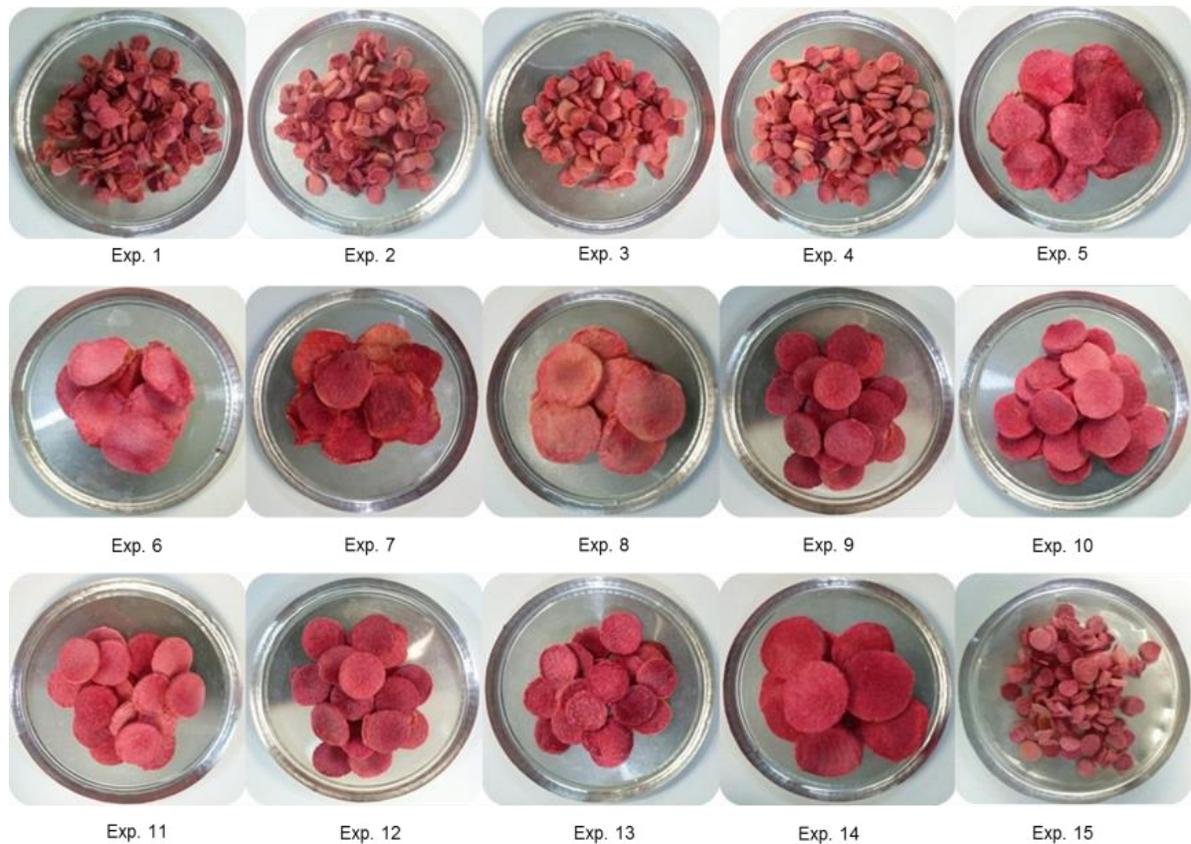


Figura 3.30 Muestras de ciruela liofilizada.

3.4.4 Propiedades térmicas de la ciruela durante el proceso de liofilización

La conductividad térmica y el calor específico son propiedades intrínsecas de los materiales alimenticios, es evidente que ambas propiedades se encuentran fuertemente relacionadas con el contenido de agua. Es difícil generar una base de datos experimental de las propiedades térmicas para las diferentes composiciones y condiciones de los alimentos. La opción más viable para predecir las propiedades térmicas de los alimentos es usar modelos matemáticos basados en su composición (Fricke y Becker, 2001).

A continuación se presenta la influencia del proceso de liofilización sobre las propiedades térmicas de las rodajas de ciruela, las cuales fueron determinadas mediante las ecuaciones descritas en la Sección 2.6.1 y 2.6.2.

3.4.4.1 Conductividad térmica

A partir de los datos experimentales obtenidos durante la liofilización de ciruela, se determinaron los valores de la conductividad térmica (k) mediante la aplicación de la ecuación empírica de Sweat (Ecuación 2.5). En la Figura 3.31 se presenta la evolución de la conductividad térmica de las rodajas de ciruela liofilizada.

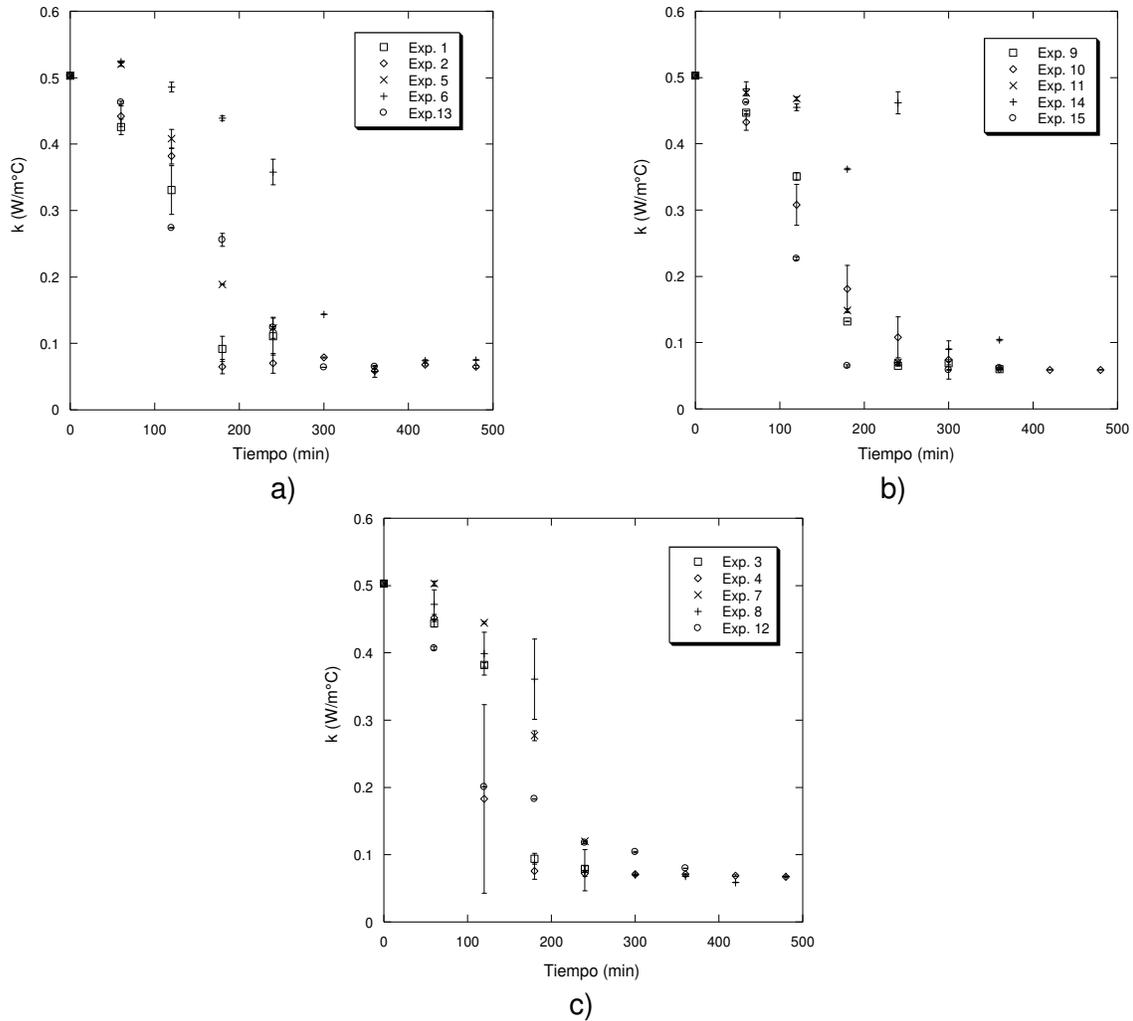


Figura 3.31 Evolución de la conductividad térmica de la ciruela durante el proceso de liofilización: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

Las rodajas de ciruela pretratadas a -60 y -20 °C presentaron un decremento en la k a partir de los 120 min para las muestras de 1 y 2 cm de diámetro; mientras que en las muestras de 3 cm de diámetro la disminución de k se presentó a partir de los 180

min de procesamiento. En el caso de las rodajas pretratadas a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ el decremento de la conductividad térmica comenzó alrededor de los 120 min para los diferentes diámetros de muestra empleados.

El comportamiento de la k de las rodajas de ciruela betabel presentó un comportamiento similar a las curvas de humedad. Estos resultados son similares a los resultados obtenidos para la determinación de la conductividad térmica en vegetales y frutos liofilizados (Donsi *et al.*, 1996; Chakraborty *et al.*, 2006). Se ha reportado que la conductividad térmica depende de la composición de la muestra, por lo cual decrece con la disminución del contenido de agua (Lewicki, 2004).

3.4.4.2 Calor específico

La variación del calor específico de las rodajas de ciruela fue obtenida mediante la ecuación empírica propuesta por Singh y Heldman (Ecuación 2.6), basada en la composición de los materiales alimenticios

La Figura 3.32 muestra como el calor específico fue disminuyendo a lo largo del proceso de liofilización para las diferentes condiciones evaluadas. Similar a las curvas de conductividad térmica, las curvas del calor específico siguen la tendencia de las curvas del contenido de humedad.

Por lo tanto, las muestras pretratadas a -60 y $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ presentaron un decremento de C_p a partir de los 120 y 180 min de procesamiento para las muestras de menor (1 y 2 cm) y mayor diámetro (3 cm), respectivamente. En lo que corresponde a las rodajas donde se empleó una temperatura de congelación de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, la disminución del C_p comenzó a partir de los 120 min de procesamiento (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$). Resultados similares fueron reportados por Chakraborty *et al.* (2006) y Kaletunç (2007) quienes evaluaron el calor específico de dos tipos de harina de mango y avena, respectivamente. Los autores observaron que el calor específico de los alimentos varía con respecto al contenido de la humedad de las muestras.

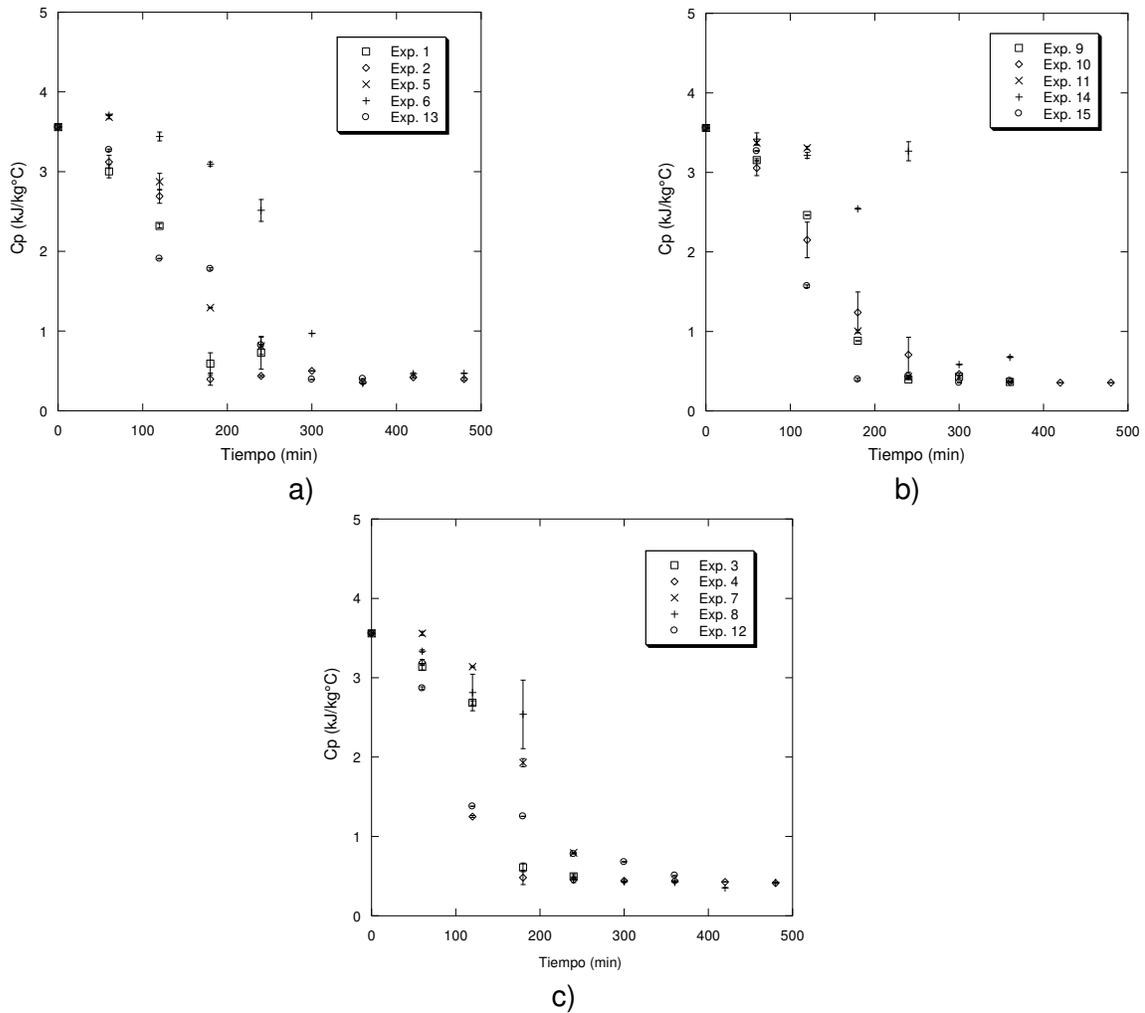


Figura 3.32 Evolución del calor específico de la ciruela durante el proceso de liofilización:
a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

3.4.4.3 Propiedades térmicas al final del proceso de liofilización

En la Tabla 3.11 se presentan los resultados de la conductividad térmica y el calor específico de las rodajas de ciruela liofilizada. El análisis estadístico (Prueba de Tukey $\alpha=0.05$) manifestó diferencias significativas entre los tratamientos realizados.

De acuerdo con los resultados obtenidos el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra influyeron significativamente sobre las propiedades térmicas de la ciruela liofilizada. Como era de esperarse, las rodajas de mayor diámetro (3 cm) y

procesadas en un menor tiempo (4 h) presentaron los valores más altos de k y C_p , los cuales corresponden a las rodajas con un mayor contenido de humedad al final de la liofilización (0.1155 g H₂O/ g s.s.). Los resultados de esta investigación muestran que los cambios en la humedad tienen una fuerte correlación lineal con las propiedades térmicas de la ciruela liofilizada (Chakraborty *et al.*, 2006; Jibril *et al.*, 2016).

Tabla 3.11 Resultados experimentales de las propiedades térmicas de rodajas de ciruela liofilizada.

Exp.	k (W/m°C)	C_p (kJ/kg°C)
1	0.0701 ^{0.0286}	0.4360 ^{0.2065}
2	0.0648 ^{0.0022}	0.3981 ^{0.0016}
3	0.0787 ^{0.0022}	0.4980 ^{0.0160}
4	0.0666 ^{0.0045}	0.4110 ^{0.0326}
5	0.0970 ^{0.0045}	0.6300 ^{0.0326}
6	0.0751 ^{0.0004}	0.4722 ^{0.0003}
7	0.1171 ^{0.0005}	0.7763 ^{0.0041}
8	0.0683 ^{0.0080}	0.4242 ^{0.0006}
9	0.0601 ^{0.0003}	0.3641 ^{0.0024}
10	0.0591 ^{0.0010}	0.3571 ^{0.0060}
11	0.0720 ^{0.0003}	0.4500 ^{0.0024}
12	0.0799 ^{0.0001}	0.5070 ^{0.0089}
13	0.0653 ^{0.0002}	0.4020 ^{0.0017}
14	0.1037 ^{0.011}	0.6790 ^{0.0080}
15	0.0619 ^{0.0080}	0.3770 ^{0.0620}

3.4.5 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela liofilizada

La liofilización es empleada como una alternativa para evitar la pérdida de nutrientes en los alimentos. Sin embargo, Shofian *et al.* (2011) indican que la retención de vitaminas en frutos tropicales depende de la naturaleza del alimento y las condiciones de secado. Ceballos *et al.* (2012) señalan que los procesos de congelación previos a la liofilización afectan de manera significativa la conservación

de nutrientes en el producto final. Por lo cual es necesario evaluar las condiciones de liofilización sobre la retención de nutrientes de la ciruela mexicana. En la tabla 3.12 se presentan las características finales de contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico (acidez titulable) de la ciruela liofilizada.

Tabla 3.12 Resultado experimentales finales del contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de rodajas ciruela deshidratada.

Exp	Pectina (%)	Ácido Ascórbico (mg/100g)	Ácido cítrico (%)
1	1.9730 ^{2.0040}	16.7501 ^{0.5338}	2.4303 ^{0.5338}
2	2.2790 ^{0.3606}	20.6650 ^{0.3178}	2.1304 ^{0.3178}
3	3.3805 ^{0.0753}	13.6848 ^{0.4610}	2.3350 ^{0.4610}
4	2.4726 ^{0.3015}	21.4072 ^{0.9377}	2.7351 ^{0.9377}
5	3.0290 ^{0.0611}	12.7533 ^{1.5017}	3.1294 ^{1.3804}
6	1.8242 ^{0.1172}	18.8062 ^{0.3957}	1.4964 ^{1.0704}
7	2.4661 ^{0.0565}	14.9584 ^{1.9847}	3.9953 ^{1.9847}
8	2.1123 ^{0.565}	24.6344 ^{1.7279}	3.7074 ^{1.7279}
9	2.1698 ^{0.4371}	16.1758 ^{0.4342}	1.8939 ^{0.4342}
10	1.4441 ^{0.3768}	20.9345 ^{0.8781}	2.1328 ^{0.7222}
11	2.3650 ^{0.0868}	17.6954 ^{0.1184}	2.0385 ^{0.1184}
12	2.4011 ^{1.5007}	18.2415 ^{0.8813}	2.2302 ^{0.8814}
13	2.8487 ^{0.1077}	24.5086 ^{0.5994}	2.5866 ^{0.5994}
14	2.4076 ^{0.2648}	20.6043 ^{0.0970}	1.9797 ^{0.0829}
15	1.8759 ^{0.5458}	17.5075 ^{0.9632}	2.1606 ^{0.9642}

El contenido de pectina de las rodajas de ciruela liofilizada para los 15 tratamientos variaron en un rango de 1.4441 - 3.3805 %. El análisis estadístico indicó que no existen diferencias significativas entre los experimentos realizados, y que los factores de estudio (temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de la muestra) no influyeron significativamente sobre el porcentaje de pectina obtenido. En general se observó que el contenido de pectina de las rodajas liofilizadas fue mayor que el obtenido en las muestras deshidratadas mediante el método convectivo. De acuerdo a Ciuzyńska *et al.* (2017) la preservación de este tipo de compuestos (geles) se debe a que la liofilización no daña la estructura porosa de los alimentos.

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que el tiempo de liofilización tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el contenido de vitamina C del producto liofilizado,

obteniéndose la mayor retención de vitamina C en las rodajas congeladas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sometidas a un periodo de procesamiento de 8 h. Santos y Silva (2008) indican que el tiempo de secado es una de las variables que tiene mayor influencia en la retención de ácido ascórbico en el proceso de secado, ya que tratamientos prolongados pueden disminuir la retención de esta vitamina; sin embargo, en los procesos de liofilización esta influencia no es muy marcada; además el empleo de bajas temperaturas durante el procesamiento, reduce las reacciones de degradación. De acuerdo con los resultados obtenidos las rodajas de ciruela liofilizada retuvieron una gran proporción de vitamina C; efectos similares fueron reportados en estudios de liofilización realizados a otras frutas tropicales como mango, papaya, melón, piña, guayaba y cereza (Hawlder *et al.*, 2006; Marques *et al.*, 2006; Shofian *et al.*, 2011)

En lo que respecta al contenido de ácido cítrico (acidez titulable) el análisis de varianza (ANOVA) indico que los factores estudiados no influyeron significativamente ($p > 0.05$) sobre la variable de respuesta. Sin embargo, se observó que los experimentos donde se empleó una temperatura de congelación de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ presentaron una mayor retención de ácido cítrico. Ceballos *et al.* 2012 realizaron un estudio sobre la influencia de la velocidad de congelación sobre los parámetros de calidad de guanábana, los investigadores reportaron que el empleo de una congelación lenta favorece la retención de nutrientes en el producto final.

3.5 Optimización del proceso de liofilización de ciruela mexicana

La metodología de superficie de respuesta puede ser empleada para predecir las condiciones óptimas del proceso de liofilización de frutas, vegetales y algunos cultivos agrícolas (Bera *et al.*, 2012; Cortés *et al.*, 2015). Como parte de este estudio se realizó la optimización de los factores del proceso de liofilización (temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de la muestra), teniendo como finalidad minimizar el costo para obtener un producto liofilizado aceptable (baja a_w , X , ΔE y alta producción).

3.5.1 Características finales de la ciruela mexicana liofilizada

En la Tabla 3.13 se muestran los valores finales de a_w , X , y ΔE de los experimentos de rodajas de ciruela ecotipo betabel al final de la liofilización.

Tabla 3.13 Resultados finales de la liofilización de ciruela mexicana.

Exp.	a_w	X (g H ₂ O/g s.s.)	ΔE
1	0.426 ^{0.1054}	0.0345 ^{0.0493}	10.41 ^{0.47}
2	0.331 ^{0.0701}	0.0254 ^{0.0038}	8.11 ^{0.00}
3	0.299 ^{0.1379}	0.0493 ^{0.0078}	6.61 ^{1.23}
4	0.258 ^{0.0092}	0.0285 ^{0.0004}	6.38 ^{0.05}
5	0.520 ^{0.0090}	0.0808 ^{0.0261}	14.14 ^{4.27}
6	0.239 ^{0.0032}	0.0431 ^{0.0007}	7.81 ^{0.06}
7	0.596 ^{0.0965}	0.1155 ^{0.0099}	6.98 ^{3.11}
8	0.340 ^{0.0003}	0.0314 ^{0.0001}	20.00 ^{0.02}
9	0.341 ^{0.0608}	0.0173 ^{0.0565}	13.72 ^{0.34}
10	0.362 ^{0.0120}	0.0155 ^{0.0001}	10.65 ^{0.35}
11	0.296 ^{0.0400}	0.0377 ^{0.0505}	20.56 ^{7.99}
12	0.264 ^{0.0304}	0.0513 ^{0.0002}	10.90 ^{0.08}
13	0.221 ^{0.0041}	0.0262 ^{0.0212}	18.40 ^{1.37}
14	0.522 ^{0.0042}	0.0924 ^{0.1902}	15.44 ^{0.00}
15	0.268 ^{0.0028}	0.0204 ^{0.0494}	16.46 ^{1.37}

De acuerdo con los resultados obtenidos para la actividad de agua, se pudo observar que la a_w de las rodajas de ciruela liofilizada fue alta cuando se empleó el mayor diámetro de muestra (Exp. 5, 7 y 14) debido a que estas presentan una menor superficie de contacto. Sin embargo, en la mayoría de los experimentos se logró reducir la a_w a valores menores a 0.6, lo cual indica que tendrán un comportamiento estable, sin sufrir cambios físicos provocados por microorganismos (Corrêa *et al.*, 2011; Jaworska *et al.*, 2014).

En lo que respecta a la humedad, mediante los tratamientos empleados se obtuvo una reducción al final del proceso a valores entre 0.0155 - 0.1155 g H₂O/g s.s., sin embargo, los valores obtenidos por arriba de 0.1 g H₂O/g s.s. no garantizan la estabilidad microbiológica y fisicoquímica del producto y pueden dar lugar a la

degradación del producto durante el almacenamiento (Guerrero-Beltran *et al.*, 2015). Los cambios de volumen obtenidos en las rodajas liofilizadas fue menor al 10 % por lo cual se considera que no hubo colapso estructural (Ratti, 2001; Shishehgarha *et al.*, 2002).

La diferencia total de color de las rodajas de ciruela liofilizada variaron entre un rango de 6.61 - 20.0 dependiendo de las condiciones de liofilización aplicadas. El análisis de varianza (ANOVA) indicó que los factores evaluados no tuvieron un efecto significativo ($p > 0.05$) sobre la ΔE de la ciruela liofilizada, no obstante; la ΔE de las ciruelas liofilizadas se vio influenciada por la temperatura de congelación, la cual afecta en particular los valores de **L** (luminosidad). Estos resultados son congruentes con los reportados en literatura para diversos alimentos liofilizados (frutos, cultivos y vegetales) los cuales adquirieron una mayor luminosidad al emplearse una menor temperatura de congelación (Reyes *et al.*, 2008; Jokic *et al.*, 2009; Ishwarya y Anandharamakrishnan, 2015; Ergün *et al.*, 2016).

3.5.2 Consumo de energía, producción y costo de la ciruela mexicana liofilizada

La liofilización ha sido empleada ampliamente para obtener frutas y vegetales deshidratados con una alta calidad. El elevado consumo de energía durante el proceso de liofilización es el mayor problema que limita la aplicación de este método. Una de las consideraciones más importantes es la reducción del tiempo y consumo de energía manteniendo la forma y la calidad de los productos (Huang *et al.*, 2009; López-Quiroga *et al.*, 2012). La Tabla 3.14 muestra los resultados experimentales del consumo de energía, producción y costo total del proceso de liofilización de ciruela mexicana.

Tabla 3.14 Resultados experimentales de consumo de energía, producción y costo.

Exp.	Energía (kW·h)	Producción (kg/h)	Costo (\$·kg ⁻¹)
1	1.3233	0.003970	56.7200
2	1.3279	0.001970	57.1520
3	1.3372	0.004030	55.8760
4	1.3329	0.001974	57.0364
5	1.4791	0.004170	54.0047
6	1.4640	0.002000	56.2993
7	1.4545	0.004340	51.8885
8	1.4042	0.001980	56.8660
9	1.3993	0.002602	56.3197
10	1.4018	0.001950	57.7408
11	1.4067	0.003970	56.7228
12	1.3878	0.002700	55.6018
13	1.3501	0.002630	57.0804
14	1.4769	0.002818	53.2764
15	1.4053	0.002620	57.3001

El consumo de energía para la liofilización de rodajas de ciruela mexicana se encontró en un rango entre 1.32 – 1.47 kW·h. Una tendencia similar fue reportado por Baeghballi *et al.* (2016) para el cálculo de energía necesaria para la liofilización de jugo de granada (1.46 kW·h). El análisis de varianza (ANOVA) indicó que el diámetro de la muestra influye significativamente sobre el consumo de energía. El mayor consumo de energía se presenta al emplear el mayor diámetro de muestra (Exp 5). Esto puede ser atribuido a que las muestras presentan una menor superficie de contacto y por lo tanto requieren un mayor tiempo de procesamiento para remover el agua congelada en la matriz sólida, lo cual se refleja en un mayor consumo de energía en la liofilización (sublimación) (Luo y Zhou, 2008; Pardo y Leyva, 2010; Jiang *et al.*, 2013). De acuerdo con Khalloufi y Ratti (2005) y Liapis y Bruttini (2006) en los procesos de liofilización, la fase de remoción de vapor de agua del alimento es la que consume la mayor cantidad de energía y esta constituye el factor de mayor costo en la liofilización.

En lo que respecta a la producción, el análisis estadístico (ANOVA) reveló que las variables independientes influyeron significativamente ($p < 0.05$) sobre la producción de ciruela liofilizada. De acuerdo a lo anterior, la mayor producción se obtuvo al emplear el menor tiempo de liofilización y el mayor diámetro de muestra (Exp 7), esto puede ser debido a que a estas condiciones el producto posee un contenido de humedad mayor ($0.1155 \text{ g H}_2\text{O/ g s.s.}$).

De acuerdo con la literatura, en los procesos de liofilización, el tiempo de procesamiento y el tamaño de la muestra tienen un impacto en el consumo de energía y en el costo del proceso (Luo y Zhou, 2008; Huang *et al.*, 2009). De acuerdo con los resultados obtenidos, los tratamientos donde se aplicaron tiempos de procesamiento de 4 h fueron los que presentaron un menor costo de producción, teniéndose en promedio un costo de $55.24 \text{ \$}\cdot\text{kg}^{-1}$ para las rodajas de ciruela liofilizada.

3.5.3 Superficies de respuesta

Los datos experimentales obtenidos para la actividad de agua (a_w), humedad (X), diferencia total de color (ΔE), producción (P) y costo (C_T) de la ciruela liofilizada (Tabla 3.13 y 3.14) se utilizaron para desarrollar mediante regresión lineal múltiple, polinomios de segundo orden; los cuales fueron empleados para predecir el comportamiento de las variables de respuesta en función de los factores estudiados (temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de la muestra) mediante la elaboración de gráficas de superficie de respuesta.

3.5.3.1 Actividad de agua

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales de la actividad de agua de ciruela liofilizada presentados en la Tabla 3.13. El modelo de polinomios de segundo orden que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 81 se indica en la ecuación 3.6.

$$a_w = 0.371 - 0.0186 x_1 - 0.0141 x_2 - 0.0128 x_3 - 0.0065 x_1 x_2 - 0.0092 x_1 x_3 - 0.0312 x_2 x_3 + 0.0316 x_1^2 + 0.0181 x_2^2 - 0.0538 x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

En la Figura 3.33 se muestra la gráfica de superficie de respuesta para la predicción de la actividad de agua (a_w) en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de muestra.

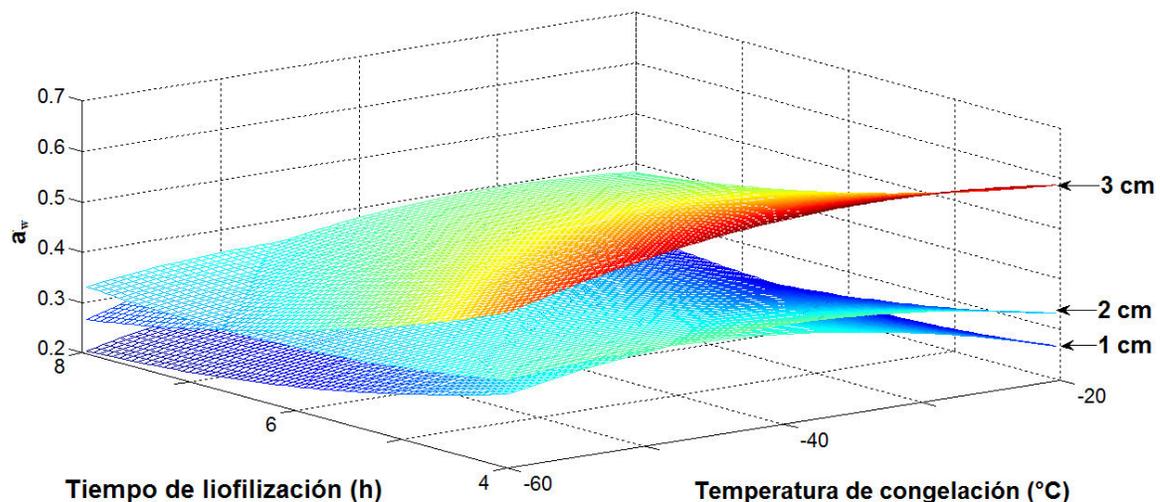


Figura 3.33 Superficie de respuesta de a_w como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra.

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que el diámetro de la muestra influyó de manera significativa sobre la actividad de agua de la ciruela liofilizada. En la gráfica (Figura 3.33) se observa que la a_w decrece a medida que se reduce el diámetro de la muestra de 3 a 1 cm; además, al aumentar el tiempo de procesamiento de 4 a 8 h se observa una tendencia decreciente de la a_w del producto final. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Hammami y René (1997) quienes mencionan que la velocidad de liofilización se incrementa cuando la superficie específica del producto se reduce. Del mismo modo, Li *et al.* (2014) evaluaron el efecto de la liofilización en rodajas de manzana; los investigadores observaron que al reducir el espesor de la muestra, se reducía la resistencia de la transferencia de calor, lo que inducía a una velocidad de secado más rápida y un tiempo de liofilización menor.

3.5.3.2 Humedad

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente para el contenido de humedad (Tabla 3.13) se realizó la regresión lineal en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 90.4 se presenta en la ecuación 3.7

$$X = 0.301 + 0.00660 x_1 - 0.0174 x_2 + 0.0205 x_3 - 0.00726 x_1 x_2 + 0.00064 x_1 x_3 - 0.0115 x_2 x_3 + 0.00541 x_1^2 - 0.00674 x_2^2 + 0.0231 x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

En la Figura 3.34 se muestra el efecto de la interacción de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra sobre el contenido de humedad de la ciruela liofilizada. El análisis estadístico (ANOVA) reveló que el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra influyeron significativamente sobre la variable de respuesta.

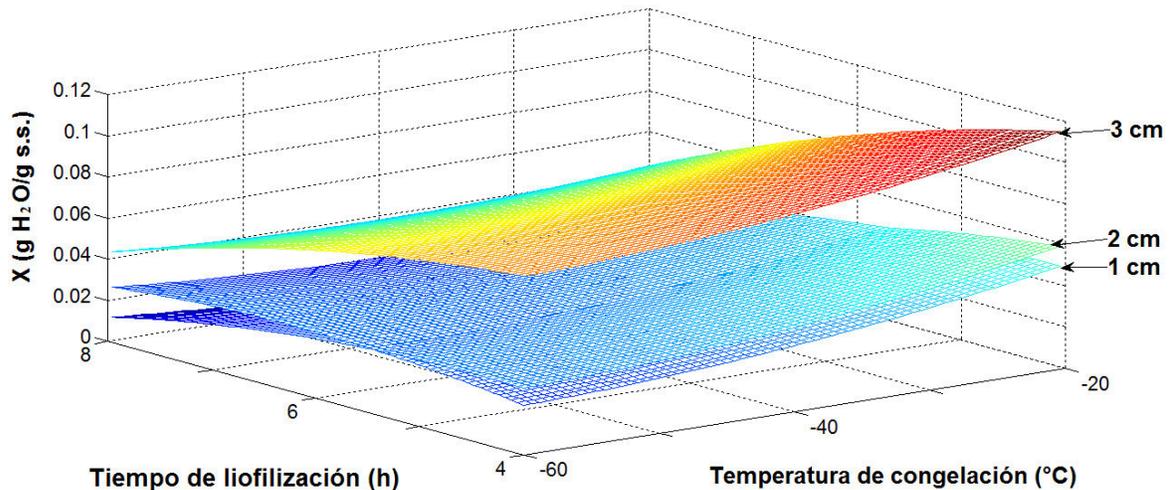


Figura 3.34 Superficie de respuesta de X como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra.

En la gráfica (Figura 3.34) se observa que la X disminuye a medida que aumenta el tiempo de liofilización y conforme se reduce el diámetro de rodaja de ciruela. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Bera *et al.* (2012) para la optimización del proceso de liofilización de plátano, quienes observaron que el

incremento del espesor de las muestras aumenta la resistencia del transporte de masa y calor, lo cual reduce la transferencia de humedad y da como resultado un mayor contenido de humedad en las muestras liofilizadas. Así mismo, Reyes *et al.* (2011) evaluaron el efecto del tamaño de partícula sobre las propiedades de arándanos liofilizados, demostrando que el empleo de muestras grandes da como resultados periodos de liofilización largos, debido a un mayor obstáculo para la difusión del agua; en este sentido, los investigadores mencionan que se debe de considerar el empleo de partículas pequeñas, las cuales aumenten la proporción del área expuesta para acelerar el proceso de secado.

Diversos investigadores han reportado que existe una relación entre la disminución de la humedad y la reducción de la geometría de la muestra para obtener productos con una humedad aceptable en un menor tiempo al emplear la liofilización como método de secado (Pei *et al.*, 2014; Franceschinis *et al.*, 2015; Chávez-Gutierrez *et al.*, 2017). El control de la humedad es necesario para incrementar la vida útil del producto, en este estudio la reducción del diámetro de muestra dio lugar a contenidos de humedad menores de 0.10 gH₂O/g s.s para las rodajas de 1 y 2 cm; no obstante, en la gráfica (Figura 3.34) se observa una tendencia creciente al emplear el diámetro de 3 cm a medida que se reduce el tiempo de liofilización dando valores de humedad altos. De acuerdo con Corrêa *et al.* (2011) en los productos con niveles de humedad y a_w superiores a 10 % y 0.60 existe la posibilidad de crecimiento de microorganismos, ya que los mohos y levaduras crecen entre 0.6 y 0.65 de a_w ; sin embargo, los valores obtenidos de X para la ciruela mexicana liofilizada fueron menores que los valores de humedad (14.6-15.5 %) reportados por Vangdal *et al.* (2017) para la liofilización de ciruelas de la especie *Prunus domestica* L.

3.5.3.3 Diferencia total de color

Los resultados experimentales de la diferencia total de color (ΔE) de la ciruela liofilizada (Tabla 3.13) se utilizaron para ajustar un modelo de segundo orden por regresión lineal. El modelo matemático que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 61.10 se presenta en la ecuación 3.8.

$$\Delta E = 16.8 - 0.80 x_1 - 0.57 x_2 + 1.64 x_3 + 2.68 x_1 x_2 + 1.32 x_1 x_3 + 1.15 x_2 x_3 - 2.94 x_1^2 - 1.99 x_2^2 - 1.64 x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

En la Figura 3.35 se muestra la gráfica de superficie de respuesta para la predicción de la diferencia total de color de ciruela en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra. El análisis de varianza (ANOVA) reveló que las variables independientes no influyeron significativamente sobre la ΔE de la ciruela liofilizada. Sin embargo, se puede observar en la gráfica una tendencia decreciente de ΔE al aumentar la temperatura de congelación de -60 a -20 °C, debido a un aumento en la luminosidad y rojez (parámetro **a**) del producto.

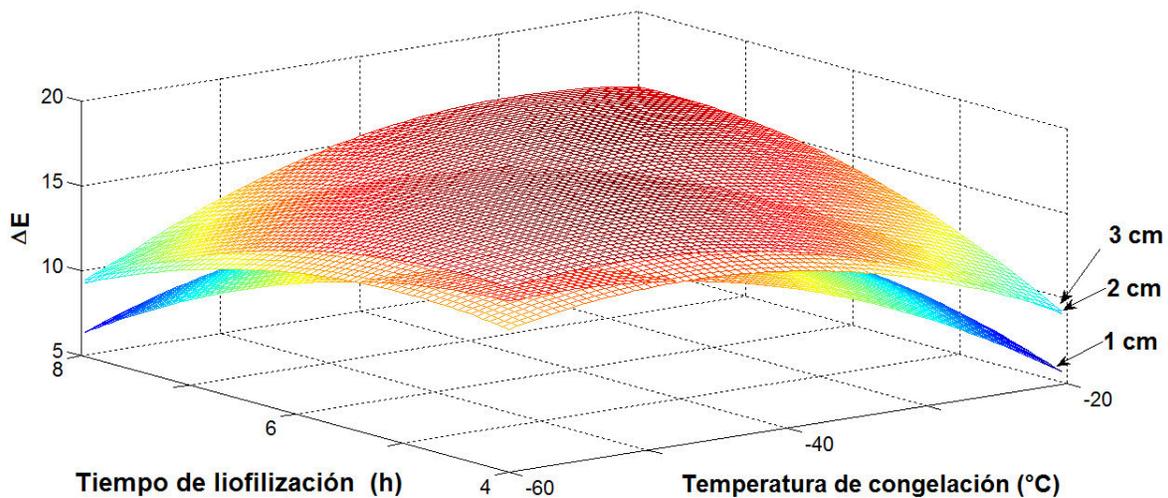


Figura 3.35 Superficie de respuesta de ΔE como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra.

El parámetro **L** se define como el flujo de luz en una dirección dada y depende del número y la orientación de las superficies reflectantes de la luz. Por lo tanto; una rápida congelación da lugar a cristales pequeños y orientados al azar, dando como resultado que la luminosidad de los productos congelados rápidamente sea mayor que la percibida en los productos congelados lentamente (Ceballos *et al.*, 2012; Ishwarya y Anandharamakrishnan, 2015). Estos resultados concuerdan con los estudios realizados por Chin y Law (2010) sobre *Ganoderma tsugae* Murrill, quienes reportaron que la variación de la ΔE en el producto final se debía a una alta luminosidad y un bajo pardeamiento. Así mismo, Hawlader *et al.* (2006) en el estudio del impacto de diversos métodos de secado en papaya y guanábana, concluyeron que la reducción del contenido de oxígeno en la cámara de secado reduce el pardeamiento enzimático y favorece a la retención del color de las frutas (rojez). Aunado a lo anterior, se observó un comportamiento decreciente de ΔE al incrementar el tiempo de liofilización, esto puede ser atribuido a la reducción del agua en las muestras liofilizadas, que da como resultado un incremento en la concentración de pigmentos (antocianinas) en la matriz sólida (Shih *et al.*, 2008; Serna-Cock *et al.*, 2015).

3.5.3.4 Producción

Se realizó la regresión lineal de los resultados obtenidos experimentalmente para la producción de ciruela liofilizada (Tabla 3.14). El modelo matemático que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 99.9 se indica en la ecuación 3.9

$$\begin{aligned} \text{Producción} = & 0.00263 + 0.000028 x_1 - 0.00106 x_2 + 0.000074 x_3 - & (\text{Ec. 3.9}) \\ & 0.000031 x_1 x_2 + 0.000011 x_1 x_3 - 0.000059 x_2 x_3 + 0.000025 x_1^2 + \\ & 0.000320 x_2^2 + 0.000079 x_3^2 \end{aligned}$$

En la Figura 3.36 se ilustra la gráfica de superficie de respuesta para predecir la producción de la ciruela liofilizada en función de las variables del proceso de liofilización estudiadas. El ANOVA indicó que el tiempo de liofilización y el diámetro

de la muestra influyen de manera significativa sobre la producción de ciruela liofilizada.

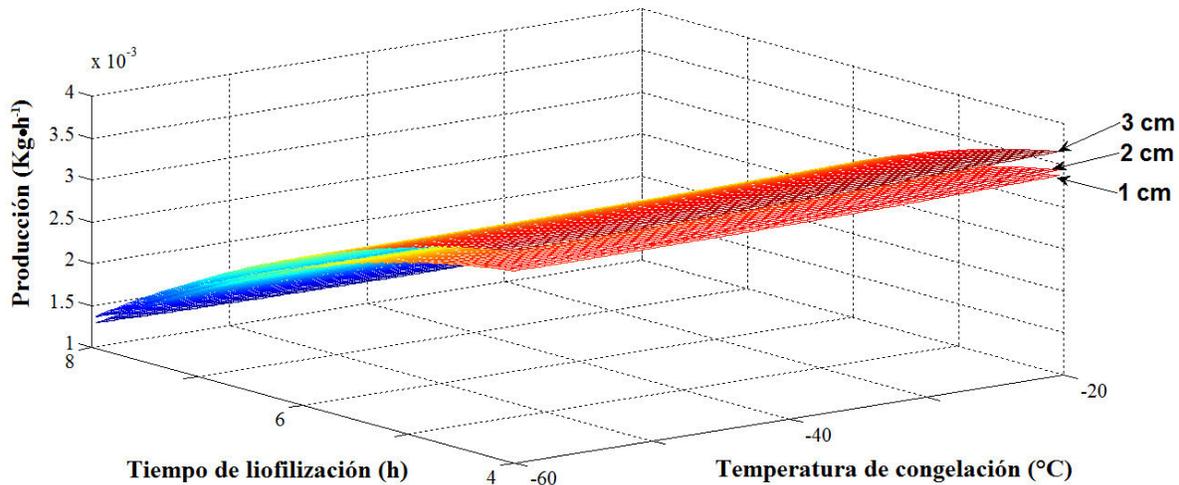


Figura 3.36 Superficie de respuesta de Producción como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra.

En la gráfica (Figura 3.36) se observa que la producción de ciruela liofilizada disminuye al incrementar el tiempo de procesamiento. De igual manera, se observa una ligera tendencia decreciente de la producción al disminuir el diámetro de muestra de 3 a 1 cm, este comportamiento es consistente con lo reportado por Luo y Zhou (2008) quienes mencionan que la disminución en el espesor de la muestras minimiza la producción en los procesos de liofilización.

El incremento de la producción de ciruela liofilizada debido a la reducción del tiempo de liofilización y aumento del diámetro de muestra, puede ser atribuido a que en estas condiciones el producto posee un mayor contenido de humedad (Figura 3.34) y por lo tanto incrementa el peso del producto seco, aumentando la producción (Figura 3.36). Un comportamiento similar fue reportado por Chakraborty *et al.* (2011) en la optimización de la liofilización asistida por infrarrojo de aloe vera, sus resultados demostraron que la producción de aloe vera liofilizada fue menor al aumentar el tiempo de procesamiento debido a que el peso final de la muestra disminuyó.

3.5.3.5 Costo

Los datos experimentales (Tabla 3.14) obtenidos de costo del proceso unitario para obtener ciruela liofilizada se utilizaron para ajustar un modelo mediante regresión lineal y poder predecir el comportamiento del costo de ciruela liofilizada en función de las variables evaluadas. El modelo matemático que resultó para el costo de la ciruela liofilizada con un coeficiente de correlación de 91.9 se indica en la ecuación 3.10.

$$\text{Costo} = 56.5 - 0.399 x_1 + 0.988 x_2 - 1.17 x_3 + 0.426 x_1 x_2 - 0.074 x_1 x_3 + 0.710 x_2 x_3 - 0.197 x_1^2 + 0.694 x_2^2 - 1.25 x_3^2 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

En la Figura 3.37 se muestra la gráfica de superficie de respuesta de costo de ciruela liofilizada en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra. El análisis de varianza (ANOVA) indicó que el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra influyeron significativamente sobre el costo de producción de la ciruela liofilizada.

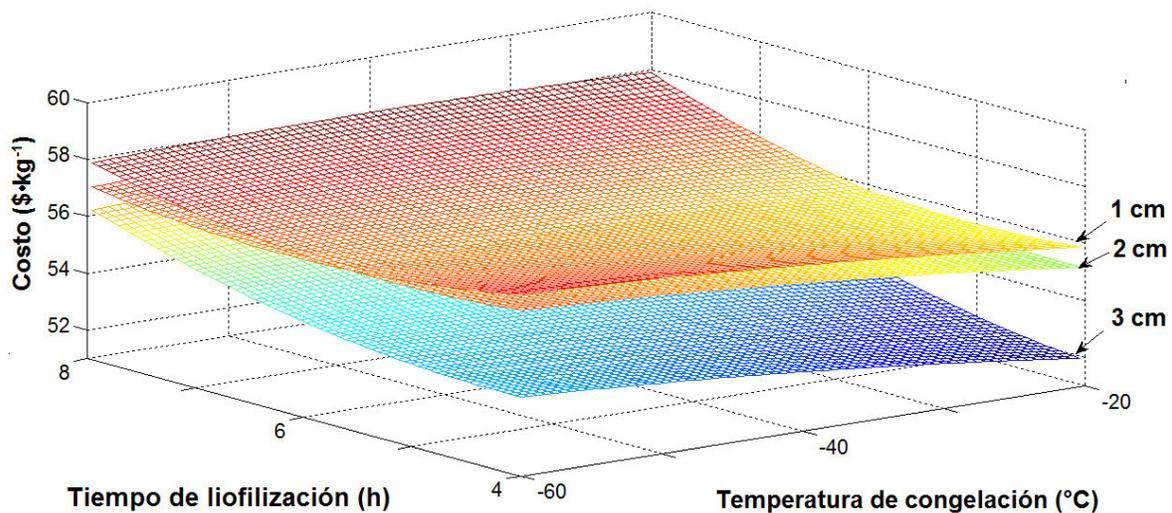


Figura 3.37 Superficie de respuesta de Costo como una función de temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de muestra.

En la gráfica (Figura 3.37) se observa que el costo del proceso unitario aumenta a medida que el tiempo de liofilización se incrementa, esto debido al aumento en los costes energéticos causados por el uso del vacío. Diversos investigadores señalan

que una de las limitaciones de la liofilización es que requiere largos periodos de procesamiento y por consiguiente consume grandes cantidades de energía para sublimar la fruta mientras se mantienen las condiciones de vacío (Almeida-Trasviña *et al.*, 2014; Serna-Cock *et al.*, 2015), es por ello que la reducción del consumo de energía es necesaria para disminuir el costo de producción (Pardo y Leiva, 2010; Benlloch-Tinoco *et al.*, 2013).

Por otro lado, en la gráfica se observa que el costo disminuye al incrementar el diámetro de rodaja de ciruela, esto debido a que estas muestras presentan una mayor humedad y por lo tanto mayor producción, lo cual beneficia a la reducción de costo (Luna-Solano *et al.*, 2005). Sin embargo, como se mencionó en secciones anteriores un contenido de humedad mayor a 10 % no es deseable, ya que el producto obtenido puede sufrir alteraciones durante el almacenamiento (Corrêa *et al.*, 2011; Fante *et al.*, 2011).

3.5.4 Gráficos de contornos

A partir de los modelos de segundo orden descritos en la sección anterior se generaron los gráficos de contornos para cada una de las variables de respuesta (actividad de agua, humedad, diferencia total de color, producción y costo) empleando el software Minitab 10. Se realizó un análisis de las regiones óptimas para cada factor con la finalidad de obtener las zonas factibles para localizar el valor mínimo o máximo deseado.

3.5.4.1 Actividad de agua

En la Figura 3.38 se muestran los gráficos de contorno de la a_w de la ciruela liofilizada. Para la Figura 3.38a se observa que la región que presentó una menor a_w (menor a 0.25) se obtuvo a una temperatura de congelación de -28 a -20 °C (valores codificados de 0.60 y 1) y un tiempo de liofilización de 5.8 a 8 h (valores codificados de -0.1 y 1). En lo que respecta a la Figura 3.38b se puede observar un punto de silla, debido a esto es difícil dar una interpretación ya que no se cuenta con una región

donde se encuentre un máximo o un mínimo. Con relación a la Figura 3.38c se observa que la región que presentó el menor contenido de a_w (menor a 0.28) se obtuvo a un tiempo de liofilización de 7.1 a 8 h (valores codificados de 0.55 y 1) y un diámetro de muestra de 1.7 a 2.15 cm (valores codificados de -0.3 y 0.15).

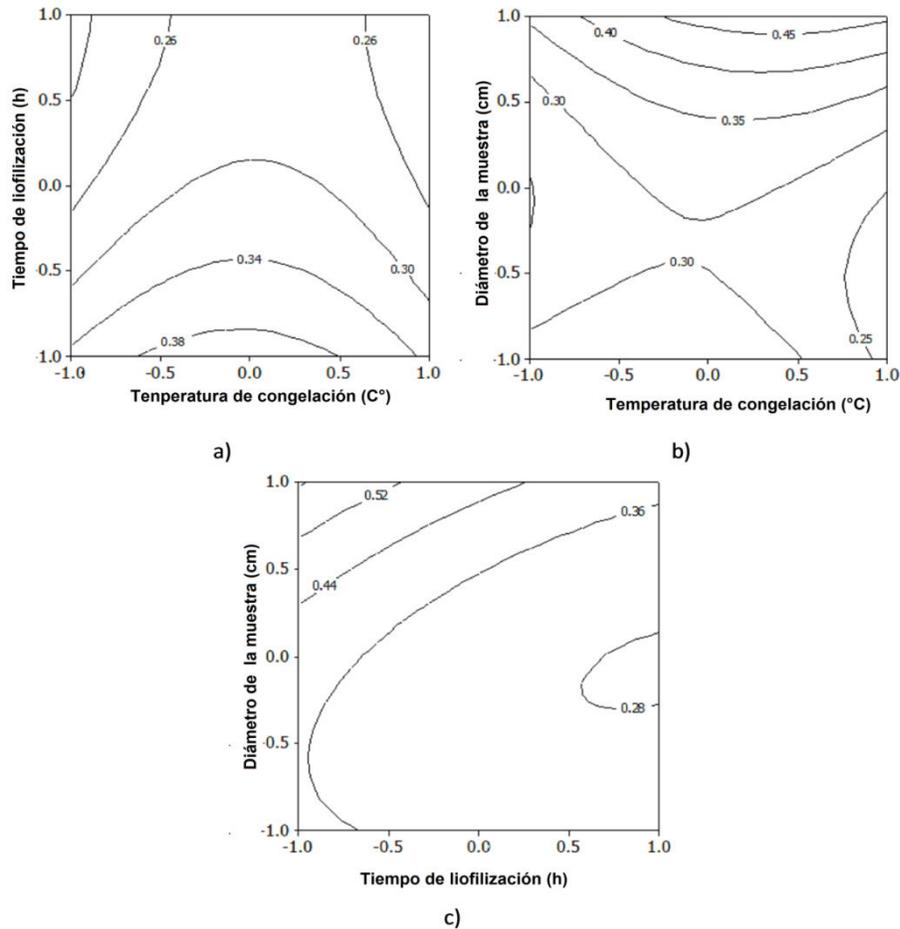


Figura 3.38 Gráficas de contornos de a_w en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra.

3.5.4.2 Humedad

En la Figura 3.39a se aprecia que el menor contenido de humedad (menor a 0.010 gH₂O/ g s.s.) se presenta al emplear una temperatura de congelación de -56 a -22°C (valores codificados de -0.8 y 0.9) y un tiempo de liofilización de 7.7 a 8 h (valores codificados de 0.8 a 1). Por otro lado, en la Figura 3.39b se observa que la mínima

humedad (menor a $0.030 \text{ gH}_2\text{O/ g s.s.}$) se puede obtener al emplear temperaturas de congelación de -60 a $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ (valores codificados de -1 a -0.5) con un diámetro de rodaja de 1.05 a 2.1 cm (valores codificados de -0.95 a 0.1). La Figura 3.39c se muestra que el mínimo contenido de humedad (menor a $0.015 \text{ gH}_2\text{O/ g s.s.}$) se obtiene al emplear un tiempo de liofilización de 7.2 a 8 h (valores codificados 0.6 y 1) con un diámetro de muestra de 1.05 a 2.47 cm (valores codificados de -0.85 a 0.47).

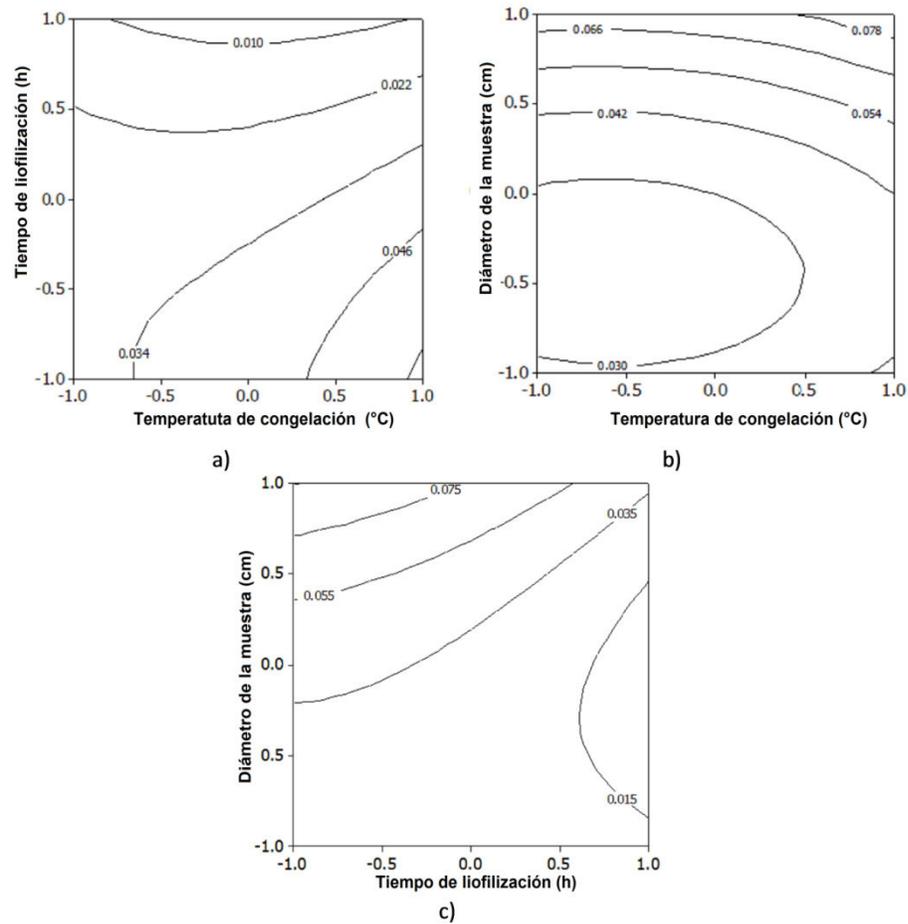


Figura 3.39 Gráficas de contornos de X en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra.

3.5.4.3 Diferencia total de color

En la Figura 3.40a se observa que la región donde se presentó el valor mínimo de la diferencia total de color (menor a 11.5) se obtuvo a una temperatura de congelación de -26 a -20 °C (valores codificados de 0.7 y 1) y un tiempo de liofilización de 4 a 5 h (valores codificados de -1 y -0.5). Para la Figura 3.40b se observa que se obtuvieron valores mínimos de ΔE (menor a 11) con una temperatura de congelación de -27 a -20 °C (valores codificados de 0.65 y 1) y con un diámetro de muestra de 1 a 1.5 cm (valores codificados de -1 y -0.5). Finalmente en la Figura 3.40c se observa que la mínima ΔE se obtuvo para un tiempo de liofilización de 7.1 a 8 h (valores codificados 0.55 y 1) y un diámetro de muestra de 1 a 1.4 cm (valores codificados -1 y -0.6).

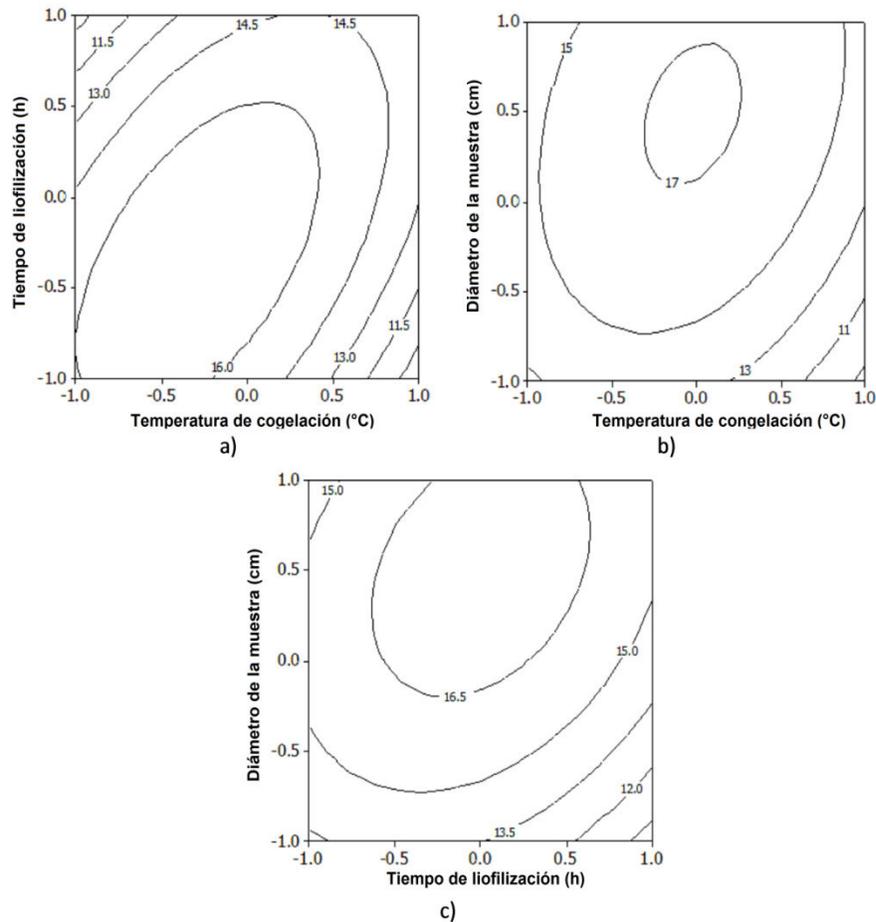


Figura 3.40 Gráficas de contornos de ΔE en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra.

3.5.4.4 Producción

En la Figura 3.41a se aprecia que la región de máxima producción (mayor a $0.0040 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) se obtuvo con la temperatura de congelación de -60 a $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ (valores codificados de -1 a 1) y un tiempo de liofilización de 4 a 4.2 h (valores codificados de -1 a -0.9). En la Figura 3.41b se observa que la región de máxima producción (mayor a $0.00277 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) se obtuvo con la temperatura de congelación de -60 a $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ y un diámetro de muestra de 2.6 a 3 cm (valores codificados 0.6 y 1). En la Figura 3.41c se aprecia que un tiempo de liofilización de 4 a 4.6 h (valores codificados de -1 y -0.67) con un diámetro de muestra de 1 a 3 cm (valores codificados de -1 y 1) se obtiene la máxima producción de ciruela liofilizada (mayor a $0.0035 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$).

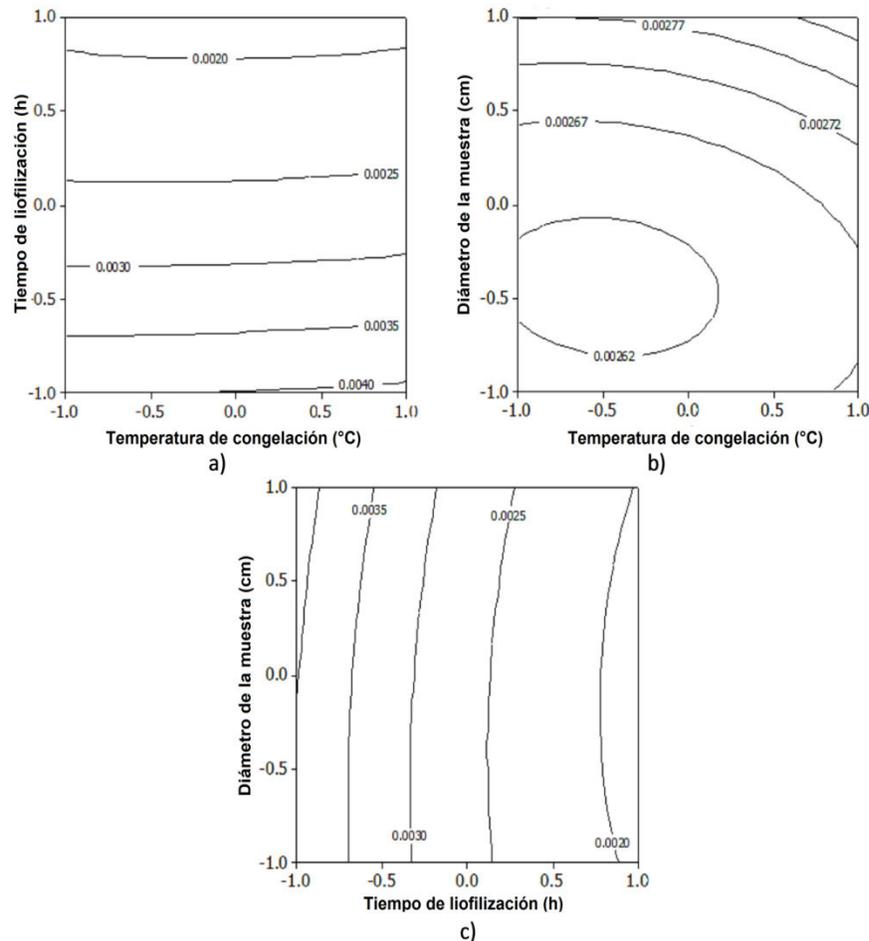


Figura 3.41 Gráficas de contornos de producción en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra.

3.5.4.5 Costo

En la Figura 3.42 se presentan los gráficos de contorno para el costo total del proceso de liofilización de rodajas de ciruela mexicana.

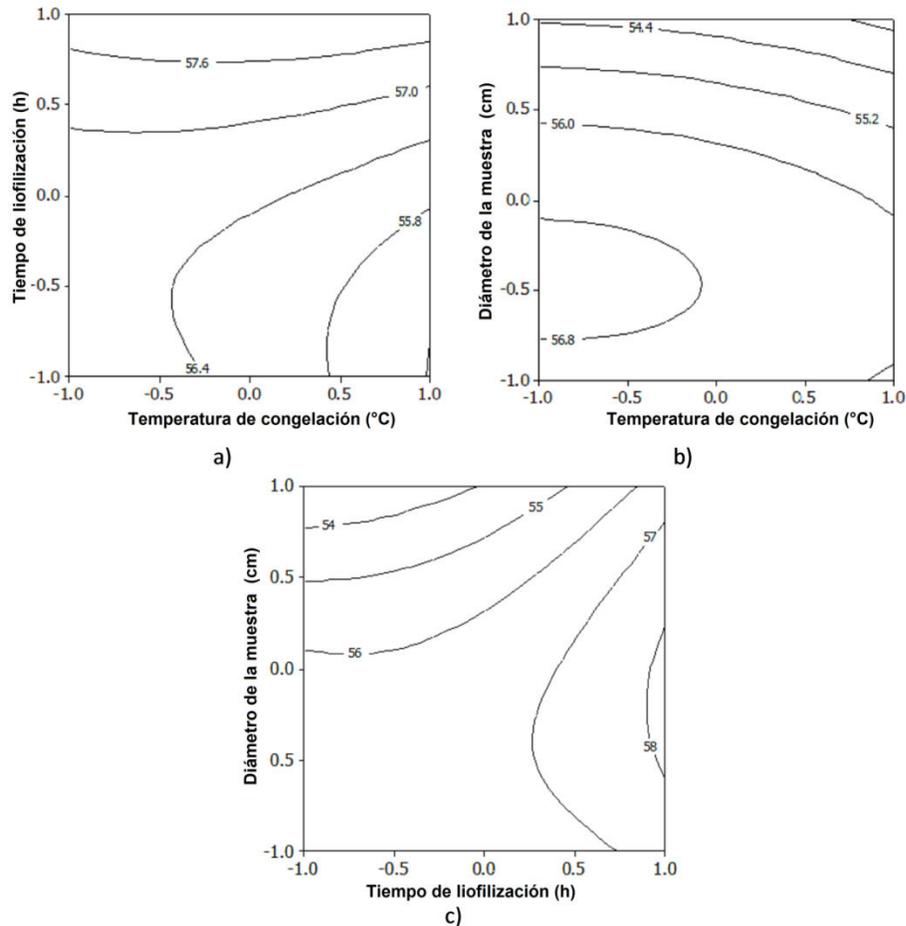


Figura 3.42 Gráficas de contornos de costo en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra.

En la Figura 3.42a se muestra que el menor costo (menor a $55.8 \text{ \$}\cdot\text{kg}^{-1}$) se obtuvo a una temperatura de congelación de -32 a -20 °C (valores codificados de 0.4 y 1) con un tiempo de liofilización de 4 a 5.9 h (valores codificados de -1 a -0.5). En lo que se refiere a la Figura 3.42b se observa que la región que presenta el menor costo (menor a $54.4 \text{ \$}\cdot\text{kg}^{-1}$) se obtiene utilizando una temperatura de congelación de -60 a -20 °C (valores codificados de -1 y 1) y un diámetro de muestra de 2.7 a 3 cm (valores codificados de 0.7 y 1); mientras que en la Figura 3.42c se aprecia que la región

donde se presentó el menor costo (menor a $54 \text{ \$}\cdot\text{kg}^{-1}$) se obtuvo a un tiempo de liofilización de 4 a 5.94 h (valores codificado de -1 a -0.3) y un diámetro de muestra de 2.75 a 3 cm (valores codificados de 0.75 y 1).

3.5.5 Gráficas de superposición de contornos

En esta sección se llevó a cabo la obtención de los gráficos de superposición de contornos para lo cual se emplearon los valores descritos en la sección 3.5.4, los cuales presentan en la Tabla 3.15 para cada una de las variables dependientes: actividad de agua, humedad, diferencia total de color, producción y costo como función de la temperatura de congelación (x_1), el tiempo de liofilización (x_2) y el diámetro de la muestra (x_3).

Tabla 3.15 Puntos óptimos de operación del proceso de liofilización de ciruela.

Variables de respuesta	Combinación de factores					
	x_1x_2		x_1x_3		x_2x_3	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
a_w	0.260	0.555	0.220	0.555	0.28	0.555
X (gH ₂ O/ g s.s.)	0.01	0.10	0.03	0.10	0.015	0.10
ΔE	6.36	16	6.36	17	12	20.56
Producción (kg·h ⁻¹)	0.002	0.0043	0.0026	0.004	0.0019	0.0035
Costo ($\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$)	51.88	57.74	54.40	56.80	54.00	57.74

Como se mencionó en secciones anteriores, las condiciones óptimas del proceso de liofilización pueden ser determinadas a partir de la región factible, la cual se obtiene de la superposición de los contornos en función de dos variables independientes y manteniendo la otra variable constante. Además, la región o zona factible para la optimización de la liofilización de ciruela mexicana tuvo que cumplir con las restricciones: mínimo contenido de actividad de agua y humedad, mínima diferencia total de color, máxima producción y menor costo.

En la Figura 3.43a se muestra la región factible en función de la temperatura de congelación y el tiempo de liofilización con un diámetro de muestra igual a cero; esta región cumple con las restricciones antes mencionadas. A partir de los resultados

proporcionados por el Software Minitab 10, los valores óptimos de las variables independientes fueron: temperatura de congelación de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un tiempo de liofilización de 4 h (valores codificados de 1 y -1 Figura 3.43b)

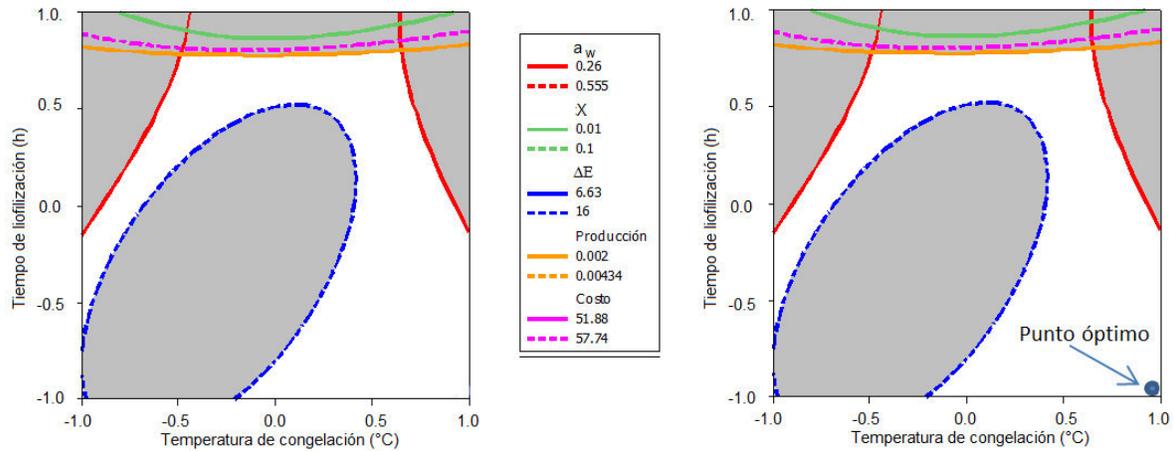


Figura 3.43 Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de congelación y tiempo de liofilización.

En la Figura 3.44a se presenta la superposición de las gráficas de contorno en función de las variables independientes temperatura de congelación y diámetro de la muestra.

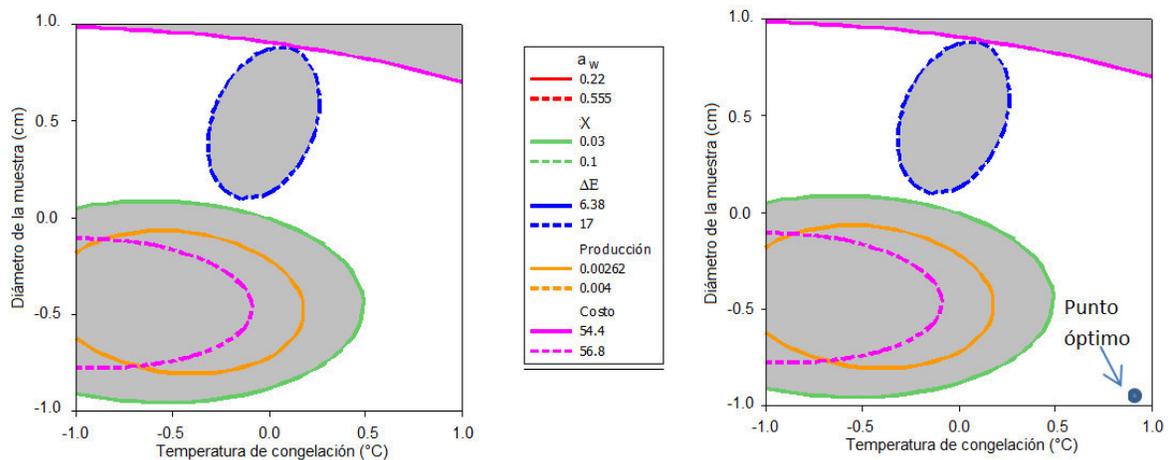


Figura 3.44 Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de la temperatura de congelación y diámetro de la muestra.

De acuerdo con los resultados proporcionados por el software Minitab 10 el punto óptimo se obtiene con valores de temperatura de congelación de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y diámetro de la muestra de 1 cm (valores codificados de 1 y -1 Figura 3.44b)

Finalmente, en la Figura 3.45a se muestra la región factible obtenida por la superposición de los gráficos de contornos en función del tiempo de liofilización y diámetro de la muestra. Los resultados obtenidos por el software Minitab 10 indican que el punto óptimo se obtiene con valores de tiempo de liofilización de 4.68 h y un diámetro de muestra de 1.85 cm (valores codificados de -0.6565 y 0.1515 Figura 3.45b)

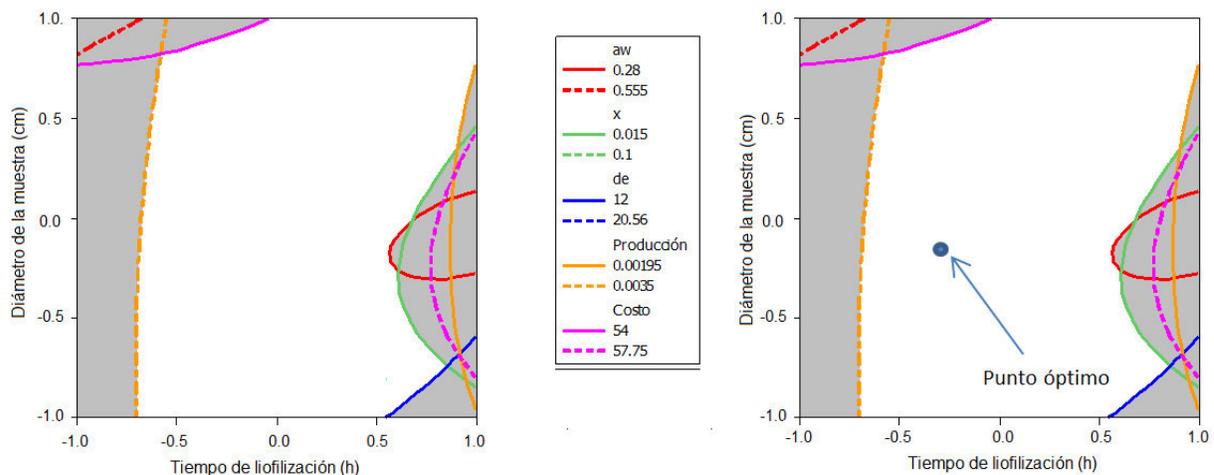


Figura 3.45 Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tiempo de liofilización y diámetro de la muestra.

A partir de los resultados anteriores, se observa que se obtuvieron las regiones óptimas para la liofilización de la ciruela mexicana (betabel) las cuales fueron: temperatura de congelación de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tiempo de liofilización de 4 a 4.68 h y diámetro de la muestra de 1 a 1.85 cm. Con estos valores se buscó la mejor combinación mediante la cual la respuesta fuera óptima. Las coordenadas correspondientes al punto óptimo fueron: temperatura de congelación de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tiempo de liofilización de 4.26 h y un diámetro de la muestra de 1.34 cm (valores codificados de 1, -0.8787 y -0.6632 , respectivamente). Los valores obtenidos fueron

sustituidos en los modelos de segundo orden descritos en la sección 3.5.3 para obtener los valores óptimos para cada variable de respuesta.

3.5.6 Validación de los puntos óptimos

La validación de los puntos óptimos se realizó de acuerdo a la metodología descrita en la sección 2.10. Para lo cual se realizaron las corridas experimentales a las condiciones óptimas. Así mismo, se calculó el error relativo empleando la ecuación 2.19. Con estas condiciones se obtuvieron los siguientes valores para las respuestas (Tabla 3.16)

Tabla 3.16 Respuestas óptimas del proceso de liofilización de ciruela.

Condiciones de operación	Parámetros	Respuestas óptimas	Respuestas experimentales	Error relativo
Temperatura de congelación= -20 °C	a_w	0.3311	0.324	2.19
	X (g H ₂ O/g s.s.)	0.0480	0.0508	5.51
Tiempo de liofilización = 4.3 h	ΔE	7.65	10.1	24.25
Diámetro de la muestra= 1.4 cm	Producción (kg/h)	0.0038	0.0037	2.70
	Costo total (\$·kg ⁻¹)	55.88	56.61	1.28

En lo que respecta a la actividad de agua y humedad el error fue debido a que se obtuvo un menor contenido de a_w y un mayor contenido de humedad al validar las condiciones de liofilización; sin embargo, los resultados obtenidos para X no son mayores a 0.1 g H₂O/g s.s., por lo cual el producto obtenido se considera estable.

Para la diferencia total de color el error fue debido a que se obtuvo una ΔE mayor con respecto a las condiciones óptimas. Los parámetros de color de la ciruela liofilizada obtenidos al ser comparados con el fruto fresco (Figura 3.46), indicaron que hubo un aumento en la luminosidad del producto ($L=23.45$), y una buena retención de los pigmentos ya que no se presentó una gran variación del parámetro a ($a=15.56$). Para el caso de la producción y costo, el error fue debido a que se obtuvo

una producción menor al óptimo, lo cual influyó en el incremento del costo de la ciruela liofilizada.

En general, los resultados experimentales obtuvieron un porcentaje de error bajo, por lo que se pueden considerar aceptables, demostrando que las condiciones óptimas de liofilización son adecuadas. Asimismo, el uso de la metodología de superficie de respuesta permitió determinar el efecto de las condiciones de operación (temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de la muestra) en cada variable para evaluar la calidad de la ciruela liofilizada.

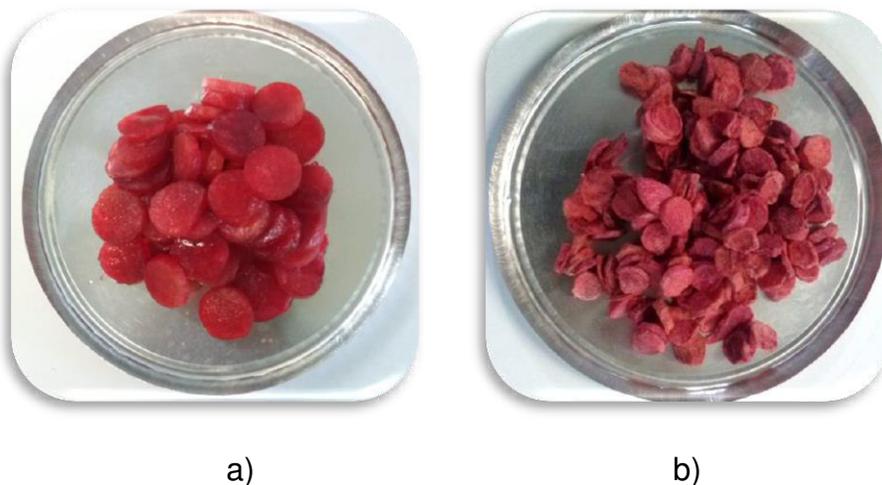


Figura 3.46 Comparación de muestras frescas (a) y muestras liofilizadas (b) de ciruela a las condiciones óptimas.

3.5.6.1 Contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela liofilizada

Se realizó el análisis del contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de las muestras procedentes de la validación de los puntos óptimos; con la finalidad de verificar si hubo una degradación de estos componentes. En la Tabla 3.17 se muestran los resultados obtenidos de estos parámetros.

Tabla 3.17 Resultados para el contenido de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de ciruela liofilizada.

Parámetro	
Pectina (%)	3.0921 ^{0.1301}
Ácido ascórbico (mg/100g)	18.5243 ^{.0826}
Ácido cítrico (%)	1.6371 ^{0.0352}

De acuerdo con los resultados obtenidos se observó una buena retención de pectina, ácido ascórbico y ácido cítrico de la ciruela liofilizada al ser comparada con la fruta fresca (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$); como se mencionó anteriormente la liofilización da resultados favorables debido a las bajas temperaturas empleadas en el proceso (Hawlander *et al.*, 2006).

Parte II

PARTE II Rehidratación de la ciruela mexicana

4.1 Rehidratación de ciruela mexicana

En años recientes, la demanda de frutos tropicales ha crecido, en especial en forma deshidratada, creando una necesidad de entender su procesamiento y propiedades. La mayoría de los productos deshidratados se rehidratan antes de ser consumidos, por lo tanto, diversos investigadores han evaluado como las variables operacionales del secado afectan la capacidad de rehidratación de las frutas tropicales (Marques *et al.*, 2006; Marquez *et al.* 2013; Vergeldt *et al.*, 2014); sin embargo, pocos son los trabajos donde se evalúa la rehidratación de la ciruela deshidratada (Kim *et al.*, 2013).

Al rehidratar, se pretende obtener productos que reconstituidos adquieran sus características iniciales en el menor tiempo posible. En este sentido la capacidad de rehidratación de los alimentos está influenciada por diversos factores, entre los que se incluyen las características y estructura del producto, las condiciones del secado, el medio rehidratante y la temperatura del medio de rehidratación (Pei *et al.*, 2014; Caliskan y Dirim, 2017).

Por lo tanto, el estudio de las cinéticas de rehidratación es necesario para mejorar la calidad de los productos y satisfacer las expectativas de los consumidores con respecto a los aspectos sensoriales del producto final (Marabi y Saguy, 2005; Zura-Bravo *et al.*, 2013). En este contexto, uno de los objetivos de este proyecto fue estudiar el efecto del proceso de secado por charolas y liofilización sobre la capacidad de rehidratación de la ciruela mexicana, para lo cual se emplearon dos medios rehidratantes y dos temperaturas de rehidratación.

4.1.1 Rehidratación de ciruela deshidratada

El proceso de secado por aire caliente usualmente destruye las células de los alimentos, debido a la contracción del alimento y a las altas temperaturas de secado. Como resultado, los productos finales obtenidos tienen una estructura compacta y un volumen reducido, por lo tanto, la capacidad de rehidratación no es adecuada (Meda y Ratti, 2005).

Por esta razón, se estudió la capacidad de rehidratación de las rodajas de ciruela mexicana deshidratadas mediante el secado por charolas, empleando metodología descrita en la sección 2.11.

4.1.1.1 Curvas de rehidratación (medio rehidratante agua)

En la Figura 4.1 y 4.2 se aprecian las curvas de rehidratación de las muestras de ciruela rehidratadas en agua a 10 y 30 °C. Claramente se puede observar la trayectoria de las curvas de rehidratación de la ciruela, mostrando que al principio la absorción es rápida, y posteriormente la velocidad de absorción se atenúa gradualmente a medida que llega al equilibrio (Contreras *et al.*, 2012).

En general, las muestras deshidratadas a 50 °C y que fueron sometidas a la rehidratación en agua a 10 °C (Figura 4.1a) llegaron al equilibrio de rehidratación a partir de los 25 min. En el caso de las muestras que fueron deshidratadas a 65 y 80 °C el equilibrio en la rehidratación se presentó a partir de los 30 min para las muestras de menor diámetro (1 cm) y 35 min para las muestras de 2 y 3 cm de diámetro (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$).

En lo que respecta a las muestras rehidratadas en agua a 30 °C, de acuerdo al análisis estadístico realizado (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$) el aumento en el contenido de humedad de las rodajas deshidratadas se presentó a partir de los 10 min de inmersión de las muestras (Figura 4.2). Observándose que en el caso de las rodajas deshidratadas a 50 y 65 °C la absorción de agua de las rodajas ciruelas llegó al

equilibrio a partir de los 20 min, y para las muestra deshidratadas a 80 °C el equilibrio se presenta a partir de los 30 min. Este comportamiento posiblemente es debido a la perdida de solubles presentada en las muestras deshidratadas a altas temperaturas de secado (80 °C). De acuerdo a Lewicky (1998) la lixiviación de solubles durante la rehidratación afecta la calidad nutricional de los productos así como su habilidad para absorber agua por lo tanto, se espera que cuanto menor sea la lixiviación mayor será la capacidad del material para absorber agua.

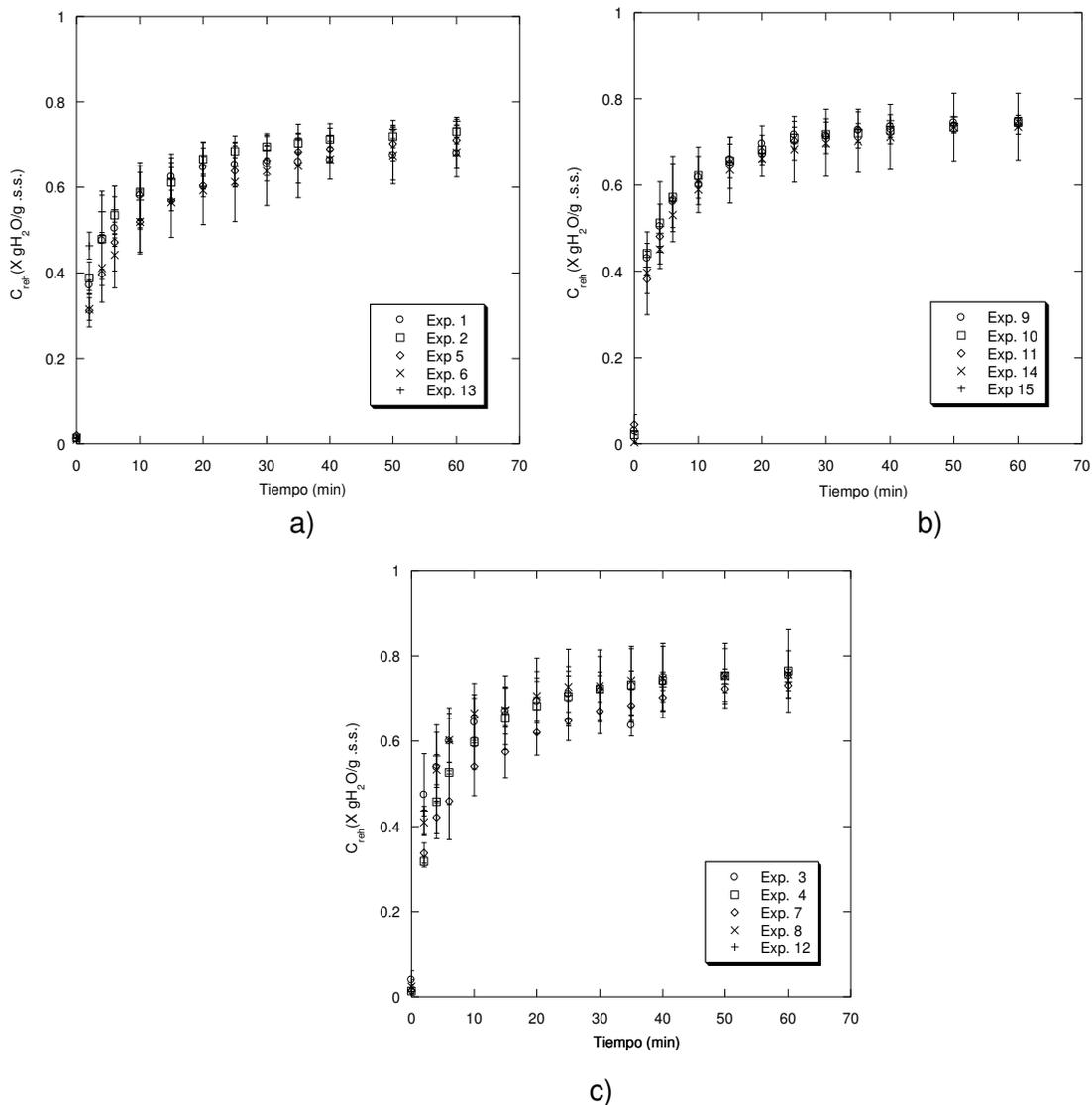


Figura 4.1 Rehidratación de rodajas de ciruela betabel deshidratadas por secado en charolas en agua a 10 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

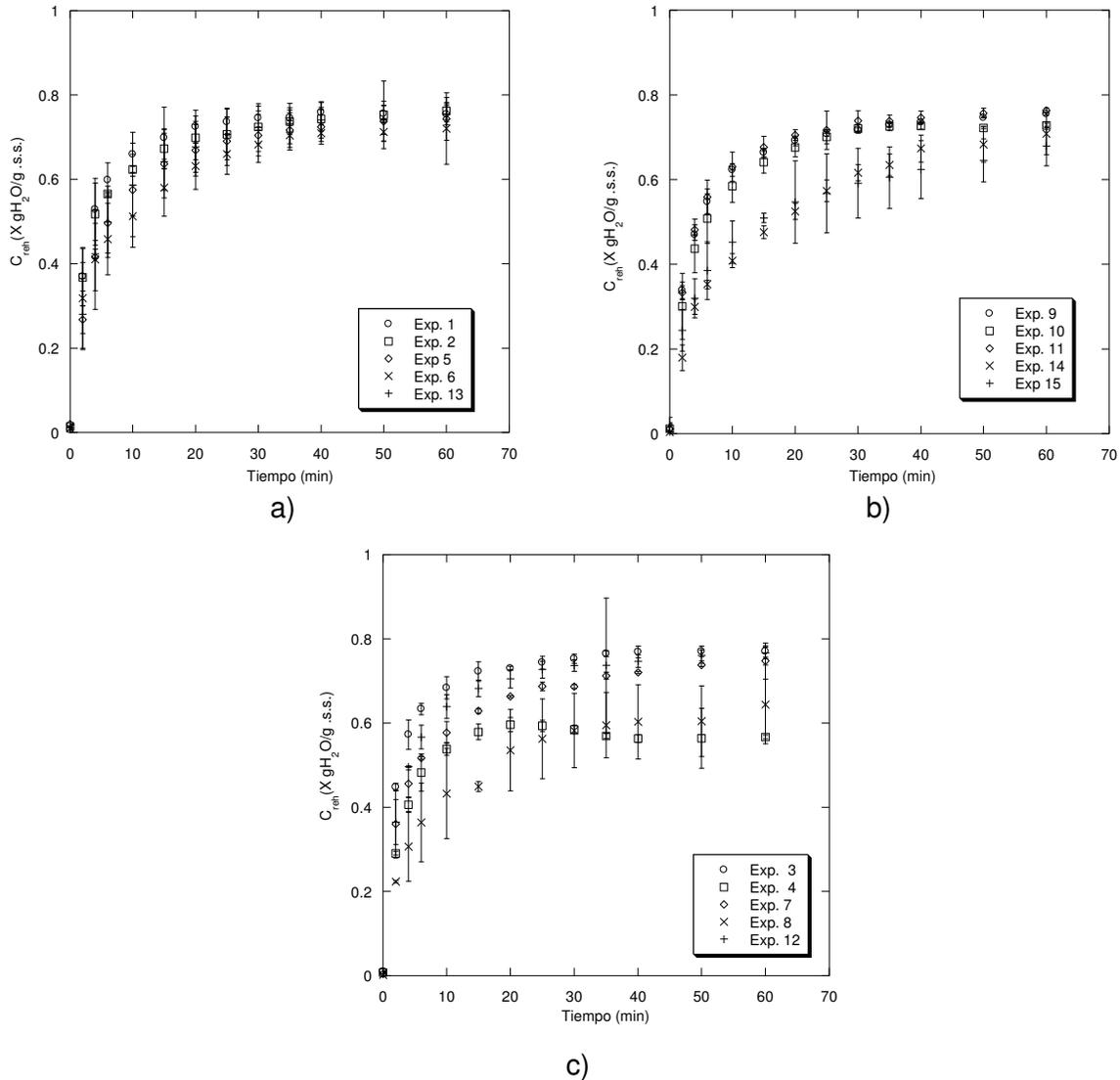


Figura 4.2 Rehidratación de rodajas de ciruela betabel deshidratadas por secado en charolas en agua a 30 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

4.1.1.2 Curvas de rehidratación (medio rehidratante leche)

En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestra la evolución de la rehidratación de rodajas de ciruela rehidratadas en leche. Las rodajas mostraron el comportamiento característico de la adsorción de la humedad durante la rehidratación, con una rápida velocidad de rehidratación al inicio seguida de un decremento de la velocidad. Este comportamiento es similar a los resultados reportados por Sacchetti *et al.* 2003 en el análisis de la rehidratación de cereales para desayuno en leche.

En la Figura 4.3 se presenta la evolución de la rehidratación de rodajas de ciruela rehidratadas en leche a 10 °C. En general, el incremento de la humedad en las rodajas de ciruela se presenta a partir de los primeros minutos (10 min) de la inmersión de la muestra en el medio.

Para las muestras deshidratadas a 50 °C el equilibrio de rehidratación se alcanzó a partir de los 25 min para las muestras de menor diámetro (1 y 2 cm), y 35 min para las muestras de 3 cm. En el caso de las muestras deshidratadas a 65 y 80 °C la estabilidad de la rehidratación se presentó a partir de los 35 min (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$). Los resultados obtenidos también demostraron que las rodajas que fueron expuestas por tiempos prolongados al secado (Exp 4 y 8), presentaron una rehidratación menor en comparación con las muestras deshidratadas en periodos cortos (Exp 3 y 11).

Los grafico de rehidratación de la rodajas de ciruela en leche a 30 °C (Figura 4.3) presentaron un comportamiento similar a las muestras rehidratadas a una menor temperatura (10 °C), en los cuales el incremento de la humedad se presenta a partir de los primeros minutos de la rehidratación. El análisis indicó que las rodajas de ciruela deshidratadas a 50 °C alcanzan la estabilidad a partir de los 25 min de inmersión, en el caso de las rodajas deshidratadas a 65 y 80 °C esta estabilidad se logra a partir de los 30 min de rehidratación.

Se observó que las curvas de rehidratación obtenidas al emplear leche, fueron menores que aquellas donde se empleó agua como medio de inmersión. Resultados similares fueron reportados por Prothon *et al.* (2001) al analizar las características de rehidratación de cubos de manzana. Los investigadores observaron que los cubos sumergidos en agua presentaron una mayor rehidratación en comparación con cubos sumergidos en yogurt; esto debido a que factores como la viscosidad, pH, contenido de proteínas y lactosa del medio lácteo influyen de manera significativa en los procesos de rehidratación.

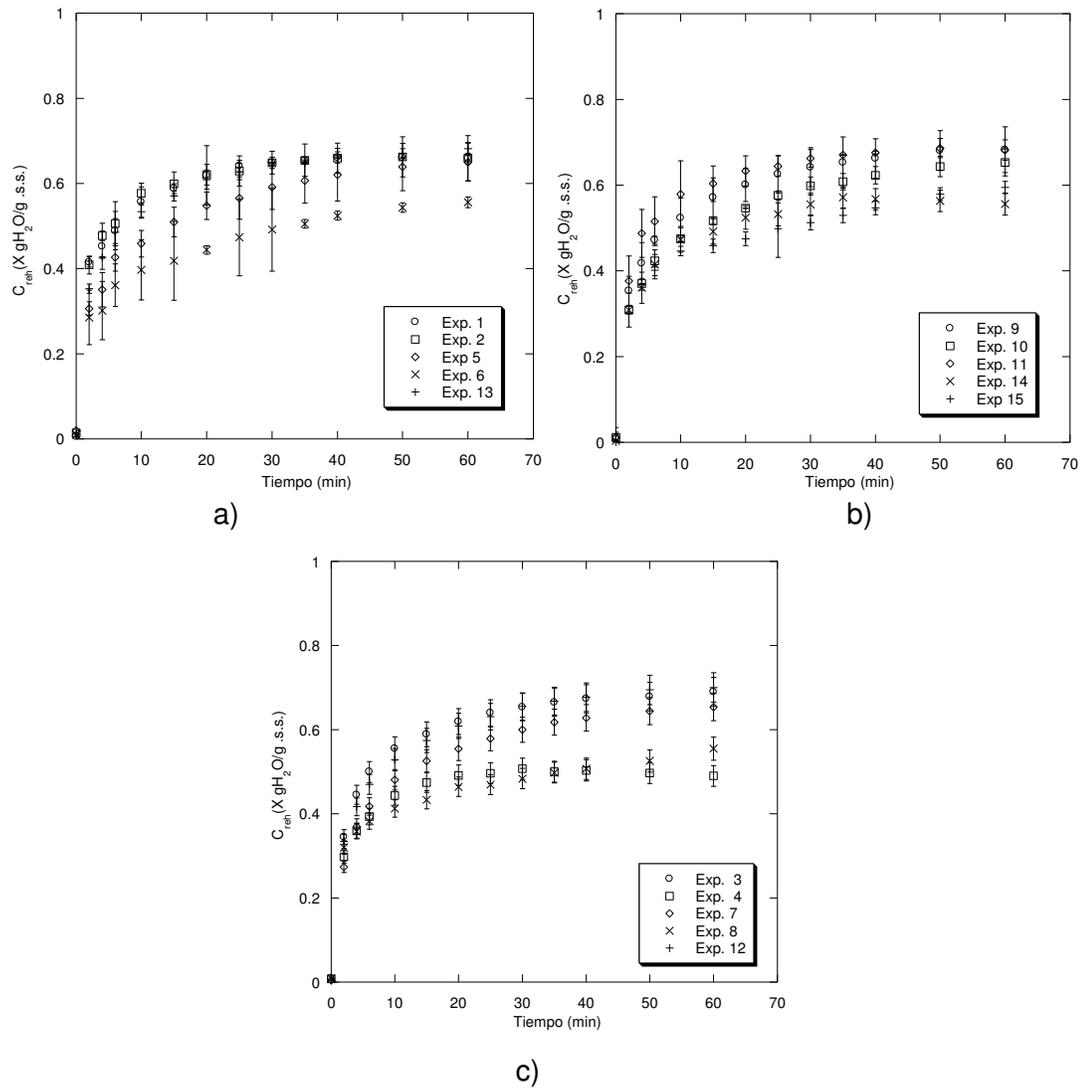


Figura 4.3 Rehidratación de rodajas de ciruela betabel deshidratadas por secado en charolas en leche a 10 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

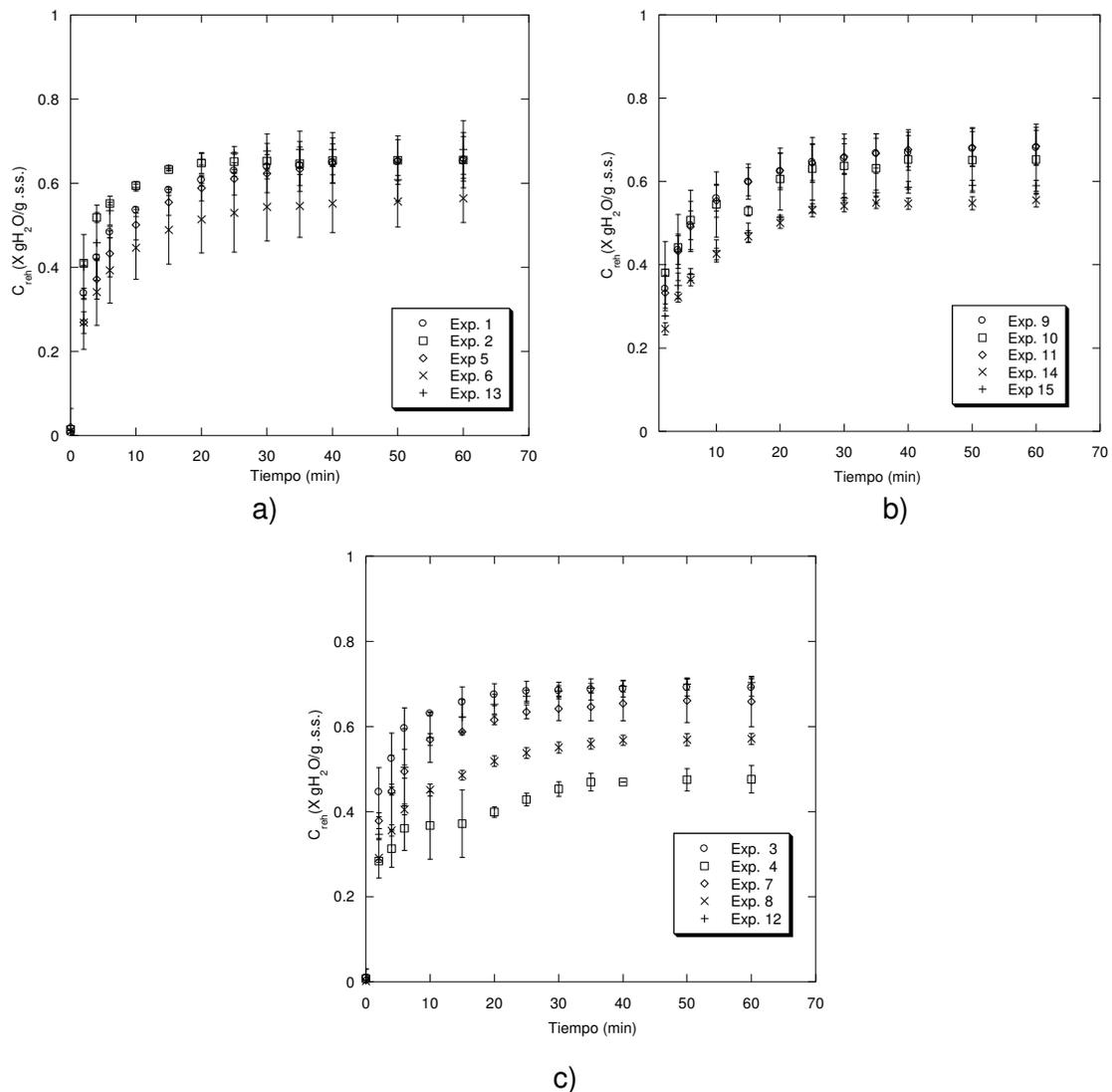


Figura 4.4 Rehidratación de rodajas de ciruela betabel deshidratadas por secado en charolas en leche a 30 °C: a) 50 °C, b) 65 °C y c) 80 °C.

4.1.1.3 Resultados finales de la rehidratación de ciruela deshidratada

Los valores experimentales de rehidratación obtenidos en las rodajas de ciruela deshidratada mediante el proceso de secado por charolas se presentan en la Tabla 4.1. El análisis de varianza (ANOVA) reveló que las variables independientes no influyeron significativamente ($p > 0.05$) sobre la capacidad de rehidratación (C_{reh}) de

las ciruelas rehidratadas en agua a una temperatura de 10 y 30 °C. Por otra parte, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra influyeron significativamente ($p < 0.05$) sobre la C_{reh} de las ciruelas rehidratadas en leche a 10 °C; mientras que el diámetro de la muestra influyó de manera significativa ($p < 0.05$) sobre la C_{reh} de las rodajas rehidratadas en leche a una temperatura de 30 °C.

Tabla 4.1 Resultados experimentales de la rehidratación de rodajas de ciruela deshidratada.

Experimento	Rehidratación (g H ₂ O/ g s.s.)			
	Agua		Leche	
	10 °C	30 °C	10 °C	30 °C
1	0.7707 ^{0.0124}	0.7596 ^{0.0205}	0.6704 ^{0.0159}	0.6523 ^{0.0078}
2	0.7460 ^{0.0002}	0.7659 ^{0.0005}	0.6502 ^{0.0308}	0.6552 ^{0.0263}
3	0.7622 ^{0.0002}	0.7721 ^{0.0038}	0.7042 ^{0.0201}	0.6913 ^{0.0279}
4	0.5866 ^{0.1152}	0.5654 ^{0.0825}	0.4980 ^{0.0965}	0.4761 ^{0.0196}
5	0.6736 ^{0.225}	0.7444 ^{0.0012}	0.6386 ^{0.0120}	0.6554 ^{0.0244}
6	0.7186 ^{0.0188}	0.7283 ^{0.0177}	0.5401 ^{0.0601}	0.5643 ^{0.0870}
7	0.7623 ^{0.0018}	0.7503 ^{0.0038}	0.6778 ^{0.0077}	0.6593 ^{0.0321}
8	0.6754 ^{0.0428}	0.6459 ^{0.0444}	0.4935 ^{0.0972}	0.5708 ^{0.0769}
9	0.7303 ^{0.0122}	0.7570 ^{0.0030}	0.6864 ^{0.3246}	0.6815 ^{0.0299}
10	0.7357 ^{0.0078}	0.7200 ^{0.0735}	0.6515 ^{0.0231}	0.6514 ^{0.0147}
11	0.7380 ^{0.0049}	0.7614 ^{0.0026}	0.6923 ^{0.0258}	0.6873 ^{0.0260}
12	0.7340 ^{0.0085}	0.7673 ^{0.0005}	0.6859 ^{0.0104}	0.7053 ^{0.0169}
13	0.7352 ^{0.0025}	0.7503 ^{0.0074}	0.6807 ^{0.0701}	0.6808 ^{0.0334}
14	0.6435 ^{0.0493}	0.7039 ^{0.0219}	0.5697 ^{0.0704}	0.5554 ^{0.0751}
15	0.6643 ^{0.0497}	0.6794 ^{0.0285}	0.5483 ^{0.0743}	0.5908 ^{0.0700}

Los resultados obtenidos indicaron que existe una menor rehidratación a la menor temperatura (10 °C) en ambos medios rehidratantes. Esto es consistente con lo reportado por Krokida y Marinos-Kouris, (2003) en el estudio de rehidratación para diversos frutos y vegetales donde la capacidad de absorción del líquido incrementó cuando se empleó la mayor temperatura de rehidratación.

4.1.1.4 Superficie de respuesta

Los datos experimentales obtenidos de la capacidad de rehidratación de la ciruela deshidratada (Tabla 4.1) se utilizaron para desarrollar por regresión lineal múltiple polinomios de segundo orden, los cuales fueron empleados para predecir el comportamiento de las variables de respuesta en función de los factores estudiados (temperatura de secado, tiempo de secado y diámetro de la muestra) mediante la elaboración de gráficos de superficie de respuesta.

4.1.1.4.1 Rehidratación en agua

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales de la C_{reh} de la ciruela rehidratada en agua a una temperatura de 10 °C (Tabla 4.1). El modelo de polinomios de segundo orden que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 94.1 se indica en la ecuación 4.1.

$$C_{reh} = 0.714 - 0.0124 x_1 - 0.0244 x_2 - 0.00564 x_3 - 0.0354 x_1 x_2 + 0.0267 x_1 x_3 + 0.0198 x_2 x_3 + 0.0253 x_1^2 + 0.0275 x_2^2 - 0.0554 x_3^2 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Asimismo, los datos obtenidos para la C_{reh} de las rodajas de ciruela rehidratadas en agua a 30 °C (Tabla 4.1) se utilizaron para ajustar un modelo de segundo orden por regresión lineal. El modelo matemático que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 87.2 se presenta en la ecuación 4.2

$$C_{reh} = 0.743 - 0.0248 x_1 - 0.0363 x_2 + 0.0030 x_3 - 0.0377 x_1 x_2 + 0.0139 x_1 x_3 + 0.0099 x_2 x_3 + 0.0193 x_1^2 + 0.0012 x_2^2 - 0.0479 x_3^2 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

En la Figura 4.5 se muestra la gráfica de superficie de respuesta para la predicción de la C_{reh} de las ciruelas rehidratadas en agua a 10 °C en función de la temperatura y tiempo de secado y el diámetro de la muestra.

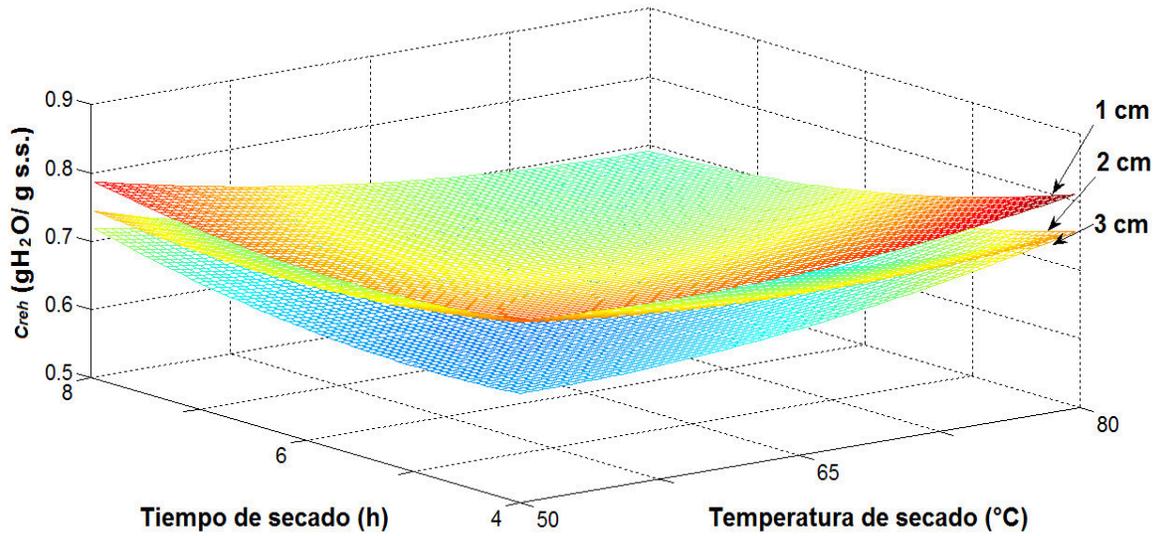


Figura 4.5 Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a 10 °C de rodajas de ciruela deshidratada.

En la Figura 4.6 se muestra la gráfica de superficie de respuesta para la predicción de la C_{reh} de las rodajas de ciruela rehidratadas con agua a una temperatura de 30 °C.

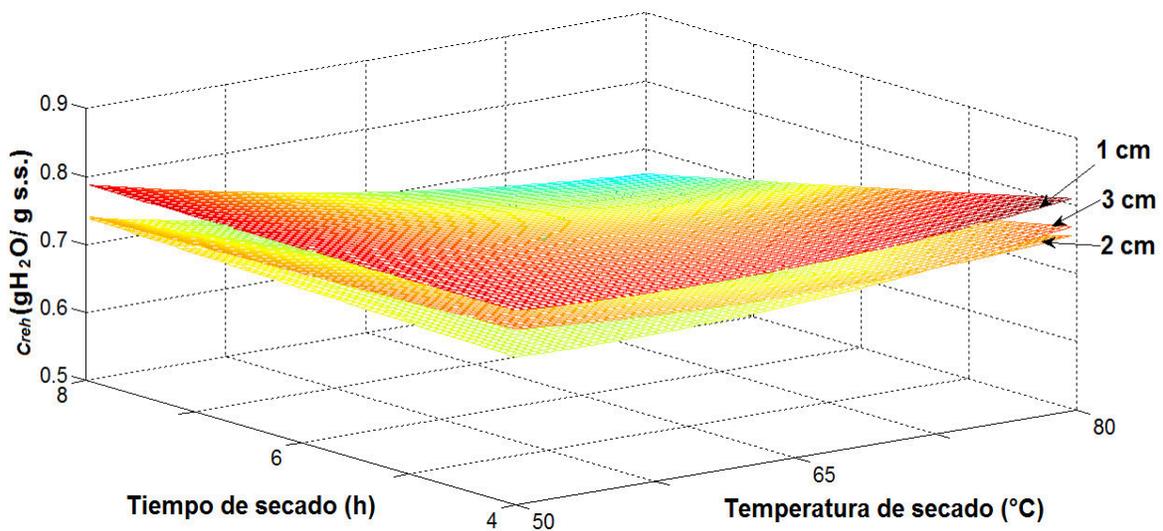


Figura 4.6 Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a 30 °C de rodajas de ciruela deshidratada.

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que las variables independientes no tuvieron un efecto significativo sobre la C_{reh} de las ciruelas rehidratadas en agua a las dos temperaturas evaluadas. Sin embargo, en ambas gráficas podemos observar una tendencia decreciente a medida que aumenta la temperatura y el tiempo de secado. Esto debido a la contracción de los poros y la formación de espacios intracelulares menos definidos durante el secado por charolas, que restringen la difusión del medio rehidratante en las rodajas de ciruela (Oliveira y Ilincanu 1999; Melquíades *et al.*, 2009).

Además, se observó una mayor capacidad de rehidratación en las rodajas de ciruela rehidratadas en agua a 30 °C; no obstante, estas muestras tuvieron una mayor pérdida de pigmentos en comparación con las rodajas rehidratadas a 10 °C. Resultados similares han sido reportados por Balasubramanian *et al.* (2011) y Mujaffar y Lee (2017) en el estudio de la rehidratación de hojas de betel y amaranto, respectivamente. Los investigadores reportaron una mayor capacidad de rehidratación al emplear la mayor temperatura de rehidratación; sin embargo se presentó un deterioro en el color del producto debido a lixiviación.

4.1.1.4.2 Rehidratación en leche

Se realizó la regresión lineal de los resultados obtenidos experimentalmente de la C_{reh} de ciruelas rehidratadas en leche a 10 °C. El modelo matemático obtenido con un coeficiente de correlación de 90.6 está representado por la ecuación 4.3

$$C_{reh} = 0.662 - 0.0121 x_1 - 0.0550 x_2 - 0.0151 x_3 - 0.0340 x_1 x_2 + 0.0139 x_1 x_3 - 0.0070 x_2 x_3 + 0.0270 x_1^2 + 0.0156 x_2^2 - 0.0973 x_3^2 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

En la Figura 4.7 se ilustra la gráfica de superficie de respuesta para predecir la C_{reh} de las ciruelas rehidratadas en leche a 10 °C mediante el modelo (ecuación 4.3) obtenido en función de las variables de proceso estudiadas.

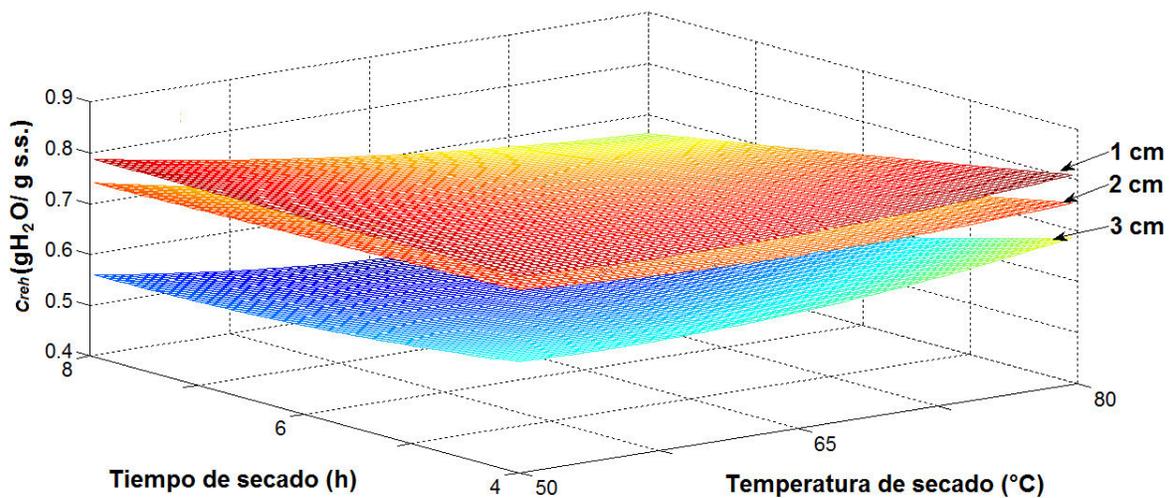


Figura 4.7 Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 10 °C de rodajas de ciruela deshidratada.

El análisis de varianza demostró que el tiempo de secado y el diámetro de la muestra influyeron de manera significativa sobre la C_{reh} de las rodajas de ciruela rehidratadas en leche a 10 °C. En la gráfica (Figura 4.7) se observa que la C_{reh} de las rodajas aumentó a medida que disminuyó el tiempo de secado. Como se comentó en la sección anterior la exposición del alimento al aire caliente durante periodos prolongados de secado afecta las propiedades del producto final, presentando una menor rehidratación (Krokida y Marinos-Kouris, 2003). Además, se observa un aumento de la C_{reh} de las rodajas de ciruela a medida que disminuye el diámetro de la muestra. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Tripathy y Kumar (2009) al evaluar el efecto de la forma geométrica en la rehidratación de cilindros y rodajas de papa, los autores concluyeron que las muestras de menor tamaño presentan una mayor rehidratación, debido a la mayor área superficial expuesta que poseen, independientemente de la temperatura del medio utilizada.

Los datos experimentales de la rehidratación de ciruela rehidratada en leche a 30 °C se emplearon para desarrollar un modelo de polinomios de segundo orden para predecir la C_{reh} de la ciruela. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 84 se indica en la ecuación 4.4

$$C_{reh} = 0.666 - 0.0105 x_1 - 0.0428 x_2 - 0.0061 x_3 - 0.0269 x_1 x_2 + \quad (\text{Ec. 4.4}) \\ 0.0188 x_1 x_3 + 0.0041 x_2 x_3 + 0.0307 x_1^2 + 0.0070 x_2^2 - 0.0892 x_3^2$$

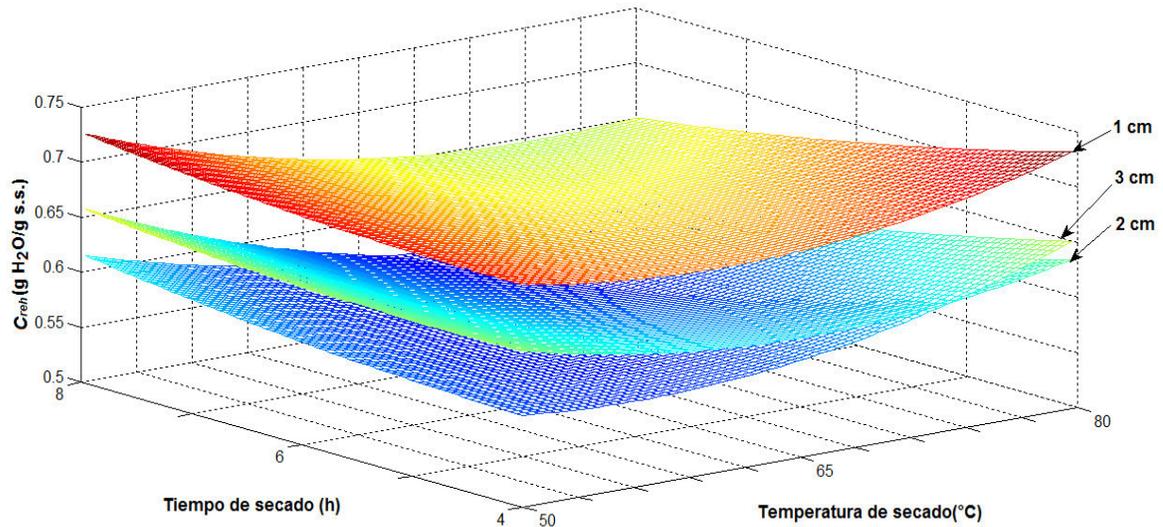


Figura 4.8 Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 30 °C de rodajas de ciruela deshidratada.

En el gráfico (Figura 4.8) se muestra el efecto de la interacción de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el diámetro de la muestra sobre la C_{reh} de la ciruela deshidratada. De acuerdo al análisis de varianza (ANOVA), la variable independiente diámetro de la muestra influyó de manera significativa sobre la C_{reh} de las muestras rehidratadas en leche a 30 °C. Las muestras rehidratadas presentaron un comportamiento similar a las rodajas que fueron rehidratadas en leche 10 °C, donde la menor capacidad de rehidratación se presentó en las muestras de mayor diámetro (3 cm).

En general, con lo resultados obtenidos se observó que la velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua en comparación con soluciones como la leche, debido a la elevada viscosidad que presenta ésta; sin embargo, este tipo de medios puede transportar sólidos de importancia nutritiva al producto como vitaminas, proteínas, minerales, entre otros (Marín *et al.*, 2006).

4.1.2 Rehidratación de ciruela liofilizada

Uno de los factores más importantes en los alimentos liofilizados es la rigidez estructural que proporciona la sublimación en el material congelado, generando un mínimo encogimiento en su estructura y poros (Rhim *et al.*, 2011). Sin embargo, la rehidratación de un producto liofilizado es fuertemente afectada por el tamaño de los cristales de hielo formados durante la congelación; debido a que la capacidad de rehidratación dependerá del grado de la ruptura estructural y celular del alimento (Ciurzyńska y Lenart, 2011). Además, Ergün *et al.* (2016) mencionan que el tiempo de procesamiento y la forma geométrica son factores que influyen en la capacidad rehidratante del alimento liofilizado.

Por lo tanto, al igual que en el proceso de secado por charolas y como se indicó en la Sección 2.11, se evaluó la capacidad de rehidratación de la rodajas de ciruela mexicana liofilizada.

4.1.2.1 Curvas de rehidratación (medio rehidratante agua)

La Figura 4.9 muestra el comportamiento de las rodajas de ciruela rehidratadas en agua a 10 °C. En general, el incremento de la humedad de las rodajas de ciruela liofilizada bajo los diferentes tratamientos realizados se presentó a partir de los primeros minutos (6 a 10 min, en promedio) de rehidratación.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las muestras liofilizadas que fueron congeladas a -60 y -40 °C; el equilibrio en la rehidratación se obtuvo a partir de los 25 min (Prueba de Dunnett $\alpha=0.05$). En el caso de las muestras congeladas a -20 °C y liofilizadas, el equilibrio se presentó a partir de los 15 min de rehidratación. Este comportamiento es posiblemente debido a la formación de poros grandes en el alimento durante la congelación lenta, ya que la absorción del agua está relacionado con el volumen de poros desarrollados durante la eliminación de la humedad (Marques *et al.*, 2006)

Un comportamiento similar en el incremento de la humedad fue observado en las muestras rehidratadas en agua a 30 °C. En las gráficas (Figura 4.10b y 4.10c) se puede observar que las muestras que fueron congeladas a altas temperaturas (-40 y -20 °C) presentaron el mayor incremento de humedad aproximadamente a partir de los 15 min de rehidratación. En el caso de las muestras donde se empleó la menor temperatura de congelación (-60 °C) la estabilidad se observó a partir de los 20 min (Figura 4.10a).

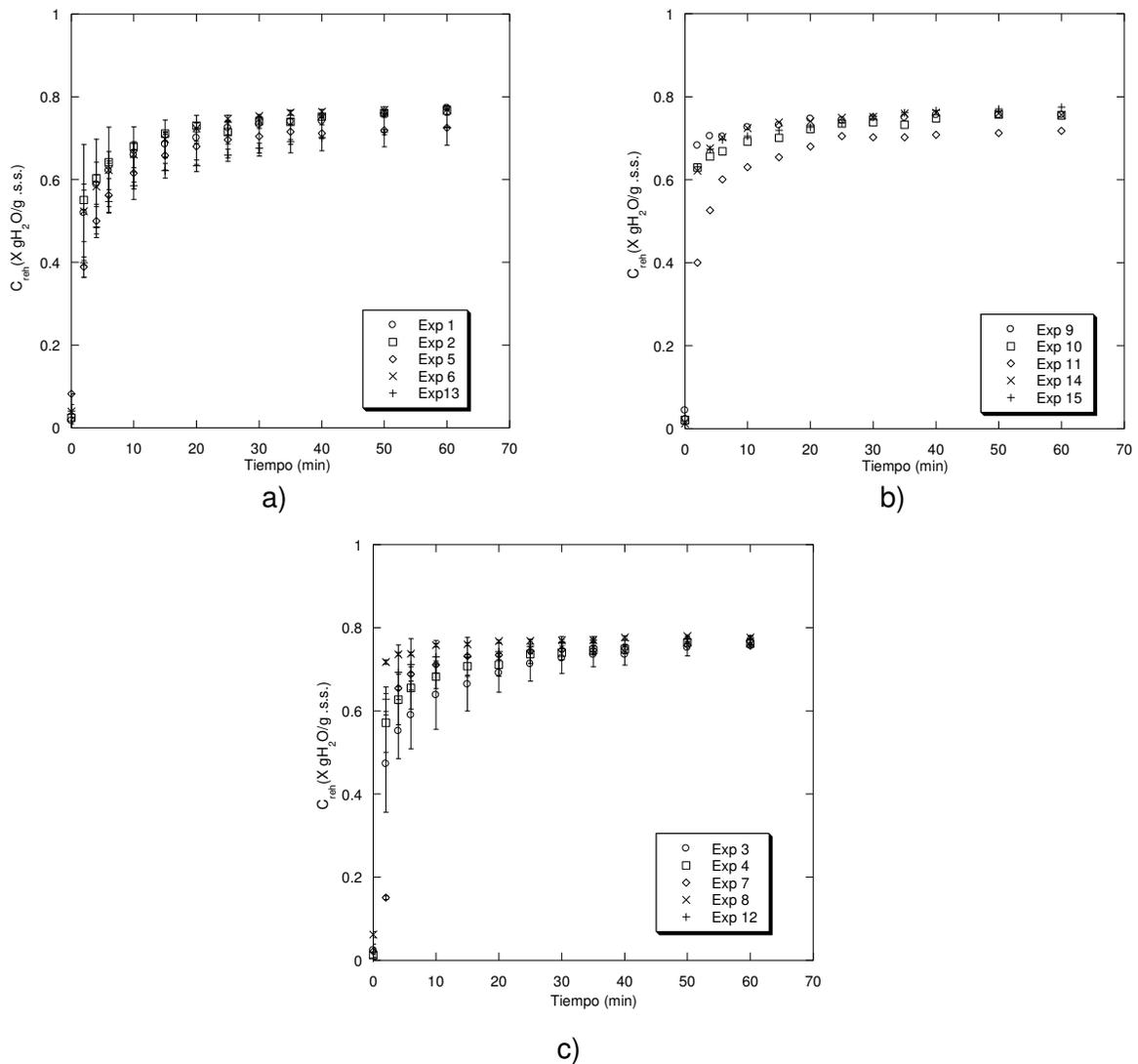


Figura 4.9 Rehidratación de rodajas de ciruela liofilizadas en agua a 10 °C: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

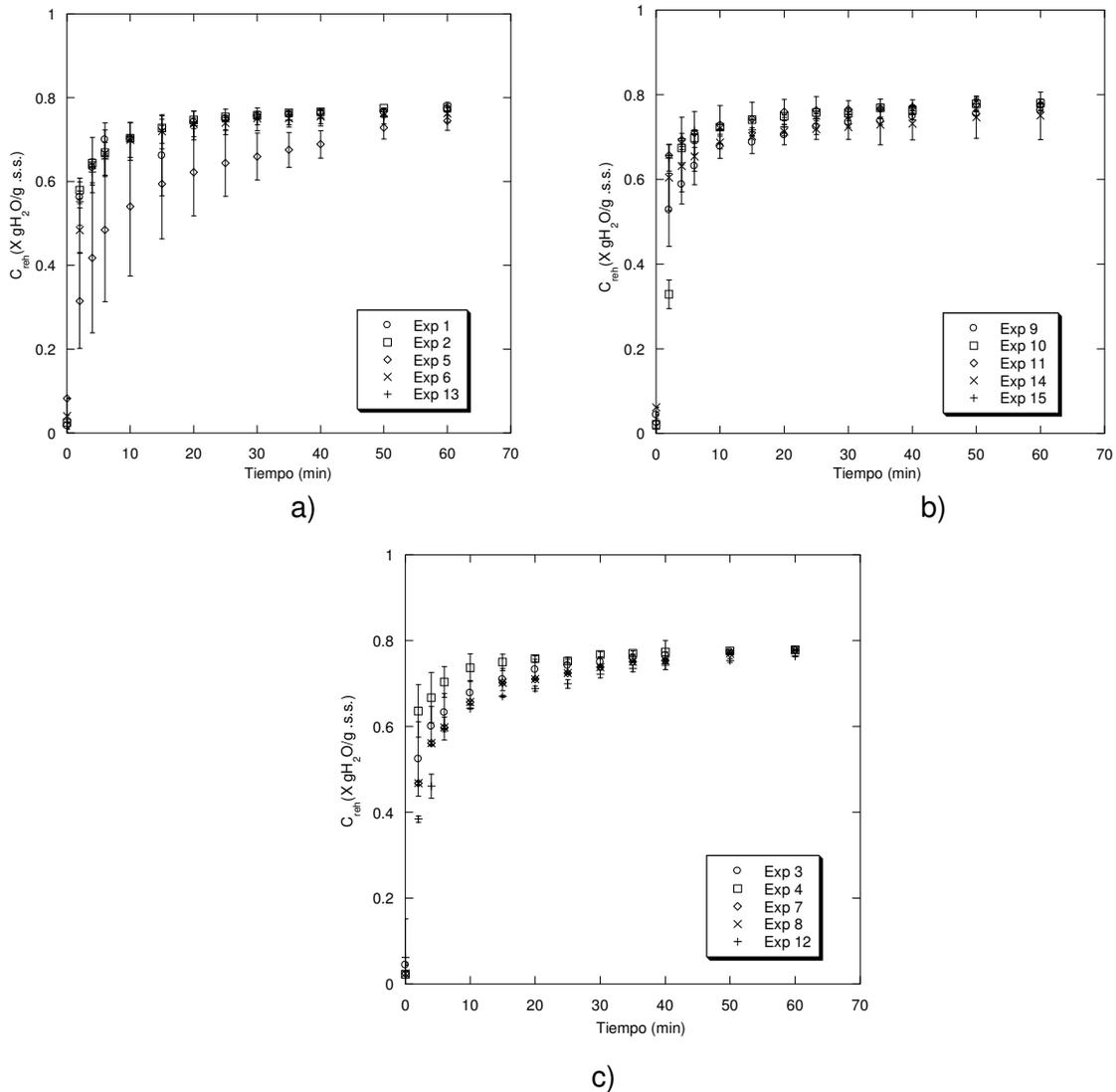


Figura 4.10 Rehidratación de rodajas de ciruela liofilizadas en agua a 30 °C: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

4.1.2.2 Curvas de rehidratación (medio rehidratante leche)

Las ciruelas liofilizadas y rehidratadas en agua a 10 °C (Figura 4.11) presentaron un incremento de la humedad en los primeros minutos de rehidratación (10 a 15 min). Las muestras liofilizadas que fueron congeladas a -60 °C, tienden al equilibrio de rehidratación a partir de los 30 min, en cuanto a las muestras que fueron congeladas a -40 y -20 °C y liofilizadas, el mayor incremento de humedad se presentó a partir de los 20 min de rehidratación.

En lo que respecta a las muestras rehidratadas en leche a 30 °C (Figura 4.12), el análisis estadístico reveló que para la menor temperatura de congelación empleada en la liofilización (-60 °C), el mayor incremento de humedad se alcanzó a los 25 min de rehidratación; y en lo que respecta a las rodajas que fueron congeladas a -40 y -20 °C, el mayor incremento de humedad se presentó a partir de los 20 min de rehidratación. Como se mencionó anteriormente, durante la congelación rápida se forman cristales pequeños que no causan grandes cavidades en el producto, por lo tanto el proceso de rehidratación es más lento (Pei *et al.*, 2014).

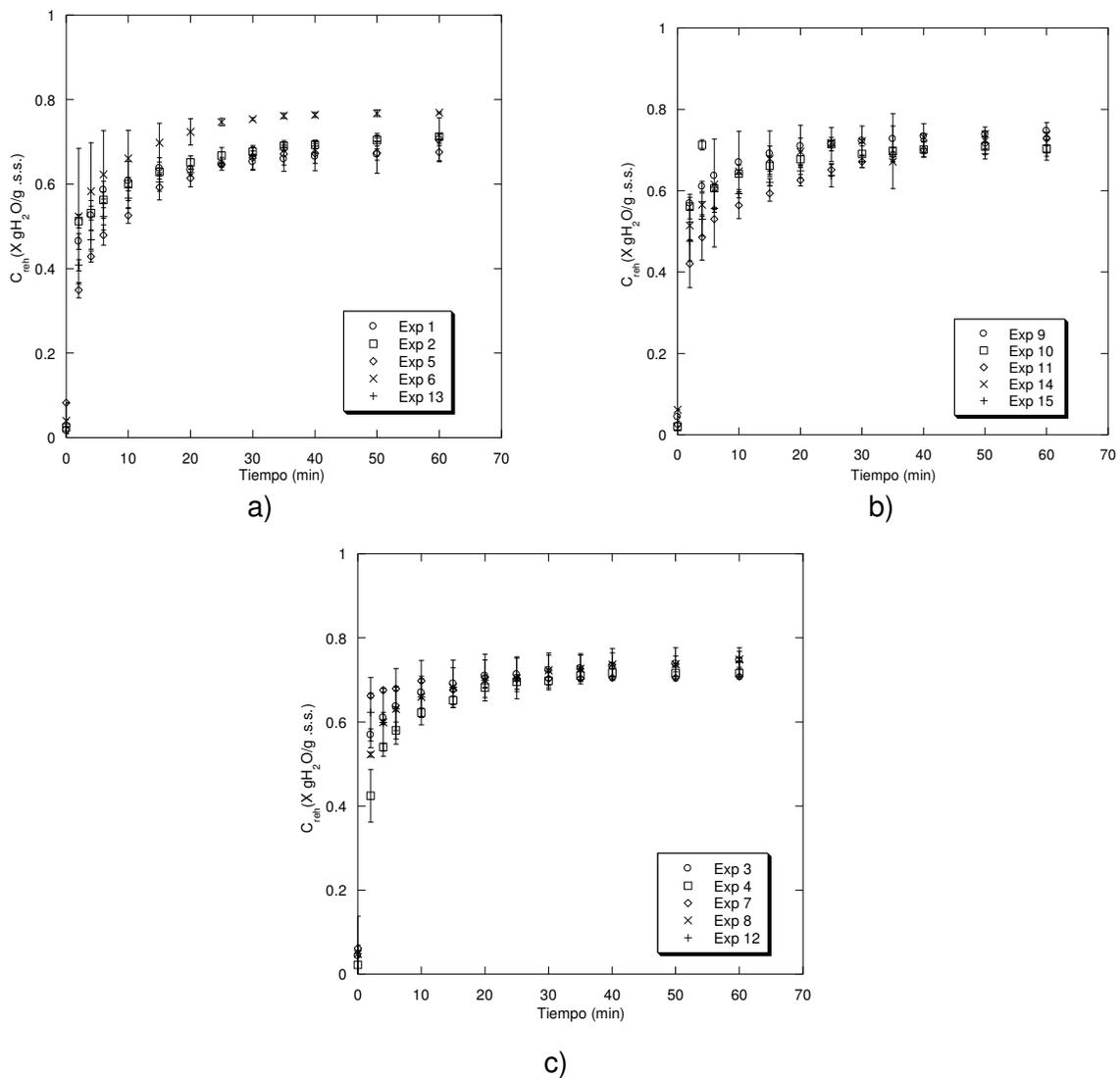


Figura 4.11 Rehidratación de rodajas de ciruela liofilizadas en leche a 10 °C: a) -60 °C, b) -40 °C y c) -20 °C.

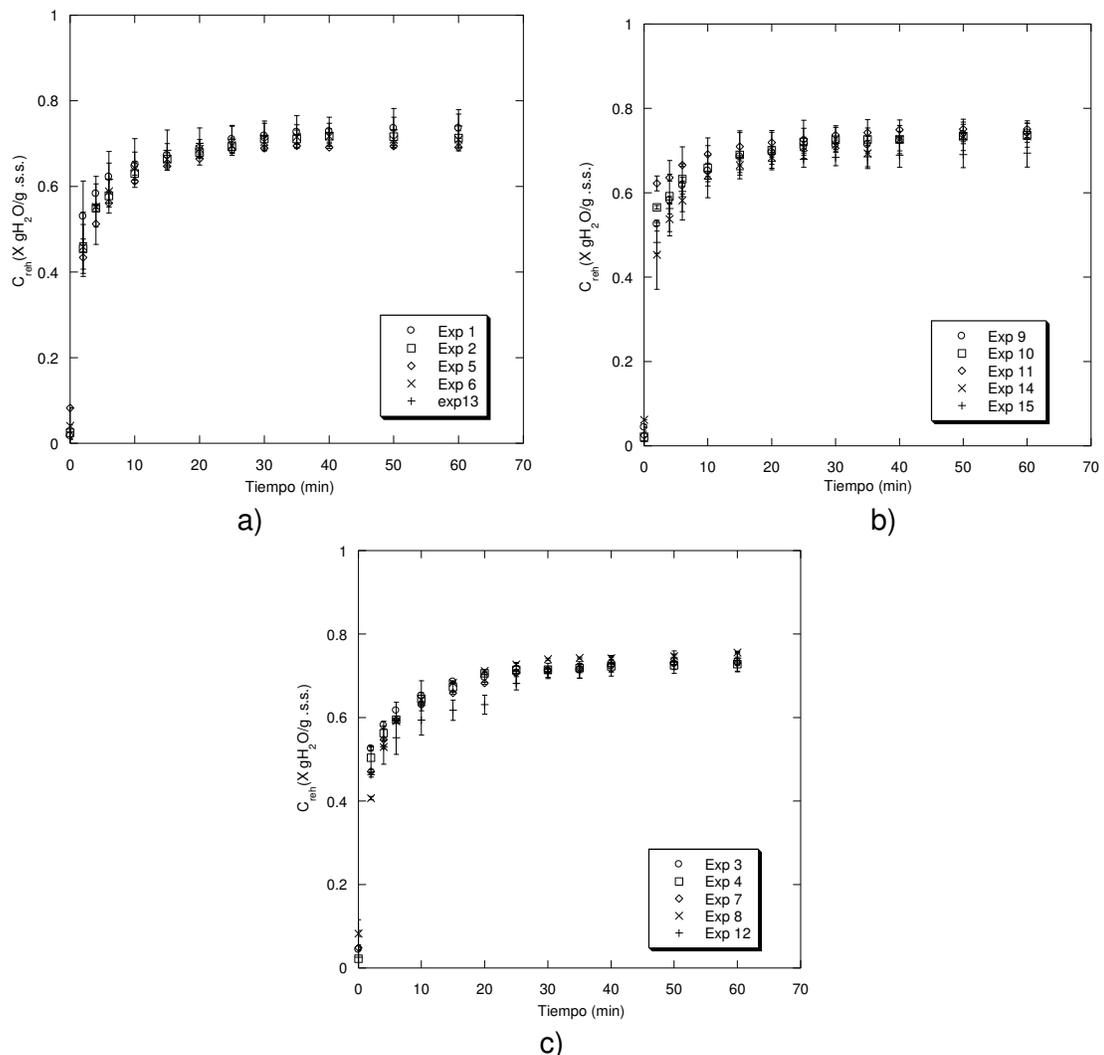


Figura 4.12 Rehidratación de rodajas de ciruela liofilizadas en leche a 30 °C: a) -60 °C, b)-40 °C y c) -20 °C.

4.1.2.3 Resultados finales de la rehidratación de ciruela liofilizada

Los resultados obtenidos de la capacidad de rehidratación de las rodajas de ciruela liofilizada empleando como medios rehidratantes agua y leche a diferentes temperaturas (10 y 30 °C) fue de 0.72 – 0.77 $\text{gH}_2\text{O/g s.s.}$ aproximadamente; obteniéndose un aumento de la humedad en promedio del 95 %. Estos resultados son similares a los reportados para la rehidratación de piezas de chayote y setas liofilizadas obteniéndose valores promedio de 79 - 81 y 74 - 99 %, respectivamente (Jaworska *et al.*, 2014; Chávez-Gutiérrez *et al.*, 2017).

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que las variables independientes no influyeron significativamente ($p > 0.05$) sobre la capacidad de rehidratación (C_{reh}) de las ciruelas rehidratadas en agua a una temperatura de 10 °C; mientras que la temperatura de congelación y el tiempo de liofilización influyeron significativamente ($p < 0.05$) sobre la C_{reh} de las ciruelas rehidratadas en agua a 30 °C. Por otra parte las variables de proceso estudiadas no influyeron de manera significativa ($p > 0.05$) sobre el C_{reh} de la ciruelas rehidratadas en leche a una temperatura de 10 y 30 °C.

Tabla. 4.2 Resultados experimentales de la rehidratación de las rodajas liofilizadas.

Exp.	Rehidratación (g H ₂ O/ g s.s.)			
	Agua		Leche	
	10 °C	30 °C	10 °C	30 °C
1	0.7457 ^{0.0035}	0.7739 ^{0.0055}	0.7050 ^{0.0517}	0.7359 ^{0.0244}
2	0.7467 ^{0.0115}	0.7771 ^{0.0020}	0.7188 ^{0.0054}	0.7136 ^{0.0370}
3	0.7627 ^{0.0001}	0.7758 ^{0.0108}	0.7442 ^{0.0152}	0.7532 ^{0.0173}
4	0.7630 ^{0.0041}	0.7811 ^{0.0001}	0.7163 ^{0.0137}	0.7366 ^{0.0079}
5	0.7230 ^{0.0422}	0.7472 ^{0.0232}	0.6648 ^{0.0206}	0.7092 ^{0.0200}
6	0.7695 ^{0.0019}	0.7691 ^{0.0045}	0.6821 ^{0.0185}	0.7301 ^{0.0025}
7	0.7584 ^{0.0023}	0.7719 ^{0.0016}	0.6945 ^{0.0034}	0.7309 ^{0.0168}
8	0.7719 ^{0.0618}	0.7726 ^{0.0011}	0.7444 ^{0.0341}	0.7568 ^{0.0228}
9	0.7563 ^{0.0148}	0.7636 ^{0.0013}	0.7485 ^{0.0211}	0.7479 ^{0.0435}
10	0.7526 ^{0.0040}	0.7831 ^{0.0103}	0.7026 ^{0.1939}	0.7457 ^{0.0285}
11	0.7275 ^{0.0010}	0.7795 ^{0.0058}	0.7243 ^{0.0146}	0.7446 ^{0.0198}
12	0.7150 ^{0.0037}	0.7685 ^{0.0011}	0.7427 ^{0.0063}	0.7414 ^{0.0334}
13	0.7299 ^{0.0003}	0.7347 ^{0.0239}	0.7032 ^{0.0143}	0.7553 ^{0.0284}
14	0.7504 ^{0.0092}	0.7519 ^{0.0564}	0.7348 ^{0.0037}	0.7374 ^{0.0065}
15	0.7763 ^{0.0005}	0.7841 ^{0.0011}	0.7175 ^{0.177}	0.7576 ^{0.0333}

En general, se observó que la C_{reh} de la ciruela fue mayor en la mayoría de los experimentos cuando se empleó una temperatura de 30 °C en comparación con la temperatura de 10 °C para ambos medios rehidratantes. Esta observación es congruente con lo reportado por Zura-Bravo *et al.*, (2013) para la rehidratación de kiwi liofilizado. Los autores indicaron que la capacidad de rehidratación es afectada por la temperatura de rehidratación; debido a que la cantidad de agua absorbida por

la fruta es mayor cuando se produce un incremento en la temperatura del medio debido a una pérdida en la firmeza del alimento.

4.1.2.4 Superficies de respuesta

Para predecir el comportamiento de la capacidad de rehidratación (medio rehidratante: agua y leche; temperatura del medio: 10 y 30 °C) de la ciruela liofilizada en función de los factores estudiados (temperatura de congelación, tiempo de liofilización y diámetro de la muestra), se desarrollaron por regresión lineal múltiple polinomios de segundo orden; los cuales fueron empleados para elaborar gráficas de superficie de respuesta.

4.1.2.4.1 Rehidratación en agua

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales de la capacidad de rehidratación empleando como medio rehidratante agua a 10 °C. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 80.0 se presenta en la ecuación 4.5

$$C_{reh} = 0.741 + 0.00562 x_1 + 0.00864 x_2 - 0.00212 x_3 - 0.00421 x_1 x_2 + 0.00056 x_1 x_3 + 0.00734 x_2 x_3 - 0.0152 x_1^2 + 0.00236 x_2^2 + 0.0257 x_3^2 \quad (\text{Ec. 4.5})$$

La Figura 4.12 muestra la superficie de respuesta de la rehidratación de rodajas de ciruela liofilizada empleando como medio rehidratante agua a una temperatura de 10 °C. El análisis de varianza indicó que las variables independientes no influyen significativamente sobre la C_{reh} de las rodajas de ciruela en agua a 10 °C.

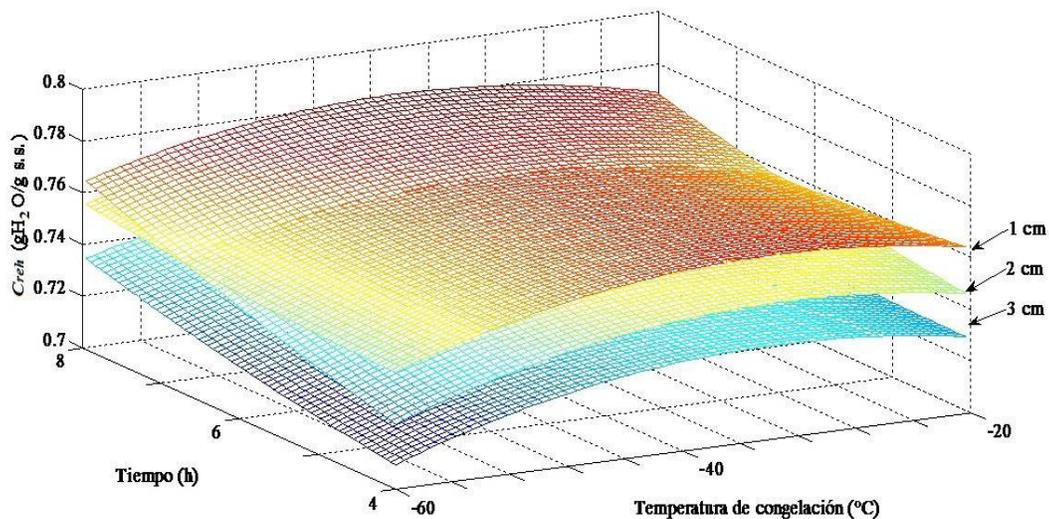


Figura 4.13 Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a 10 °C de rodajas de ciruela liofilizada.

Sin embargo, en la gráfica (Figura 4.13) se observa que a medida que aumenta la temperatura de congelación de -60 a -20 °C, la capacidad de rehidratación aumenta; de igual manera, se observa una tendencia creciente de la C_{reh} de las rodajas de ciruela, al incrementar el tiempo de liofilización de 4 a 8 h. Este fenómeno puede deberse al tamaño y distribución de los poros en la ciruela congelada, el cual tiene un impacto en la transferencia de masa durante la rehidratación, y contribuye a un aumento en la C_{reh} de las muestras liofilizadas.

Otero (2000) y Marabi y Saguy, (2005) mencionaron que la congelación lenta en los materiales alimenticios forma grandes cristales de hielo y crea poros grandes después de la liofilización, lo que provoca una mayor proporción de rehidratación en comparación con las muestras congeladas rápidamente. Por su parte, Arriola-Guevara *et al.* (2006) demostraron que la formación de poros grandes en la estructura de los alimentos, da lugar a estructuras débiles, las cuales pueden presentar desprendimientos debido al exceso de agua absorbida durante la rehidratación. Sin embargo, los productos de ciruela obtenidos no mostraron debilitamiento en su estructura, ya que no se presentó desprendimiento de partículas

de ciruela durante la rehidratación. Finalmente, los resultados obtenidos son similares a los reportados por Vergeldt *et al.* (2014) para la rehidratación de cilindros de zanahoria liofilizados. Los investigadores observaron que las muestras de zanahoria congeladas a $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (cristales grandes) se rehidrataron más rápido que las muestras congeladas a $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (cristales pequeños), debido al rápido bloqueo de los poros pequeños al rehidratarse la muestra.

Con referencia a la capacidad de rehidratación de las rodajas de ciruela empleando como medio rehidratante agua a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a partir de los resultados presentados en la Tabla 4.2 se realizó la regresión lineal en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 82.3 se presenta en la ecuación 4.6

$$C_{\text{reh}} = 0.765 + 0.00679 x_1 + 0.00347 x_2 - 0.00793 x_3 - 0.00239 x_1 x_2 + 0.00279 x_1 x_3 + 0.00176 x_2 x_3 - 0.0132 x_1^2 + 0.0165 x_2^2 + 0.00324 x_3^2 \quad (\text{Ec. 4.6})$$

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que la temperatura de congelación y el tiempo de liofilización tuvieron un efecto significativo sobre la rehidratación de la ciruela (Figura 4.14) cuando se empleó como medio rehidratante agua a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

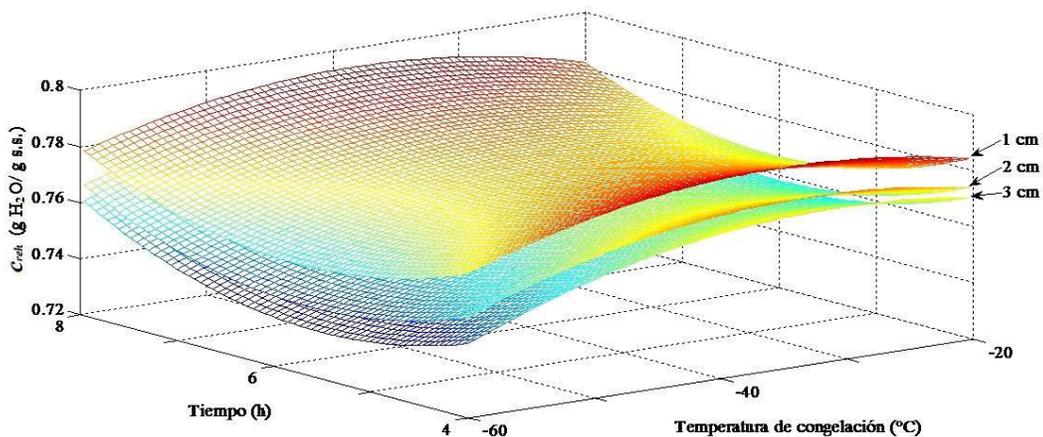


Figura 4.14 Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en agua a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ de rodajas de ciruela liofilizada.

En la Figura 4.14 se observa una tendencia creciente de la C_{reh} a medida que aumenta la temperatura de congelación (congelación lenta) y el tiempo de procesamiento. La formación de cristales largos en la estructura durante la congelación lenta (-20 °C) y los tiempos prolongados de procesamiento (8 h), posiblemente causaron un deterioro en el alimento, particularmente en los tejidos vegetales se presentan rupturas en las paredes celulares, lo cual da lugar a una alta rehidratación (Otero *et al.*, 2000; Pei *et al.*, 2014). Además, un mayor tiempo de procesamiento contribuye a la alteración del tejido del alimento y aumenta la capacidad de rehidratación de las muestras.

Esta observación es congruente con lo reportado por Rhim *et al.* (2011), quienes estudiaron el efecto de la temperatura de congelación en la rehidratación de gachas de arroz liofilizadas. Los autores mencionan que los cristales grandes formados por la congelación lenta pueden causar daños en los tejidos vegetales al perforar las paredes celulares; aunque, el daño estructural no es inadecuado, ya que promueve la restauración del producto liofilizado otorgándole una capacidad de rehidratación elevada. Sin embargo, los hallazgos obtenidos en el presente trabajo contradicen los resultados obtenidos por Harnkarnsujarit *et al.*, (2016) para la liofilización de cuajada de soja, quienes reportaron que la congelación rápida permitió una rehidratación más alta en el producto. De acuerdo con Oliveira y Ilincanu (1998) y Kim *et al.* (2013), esta discrepancia podría deberse a que la rehidratación depende del producto alimenticio, y está influenciada por muchos factores, como la porosidad, cavidades (aire) y las características del medio de inmersión.

4.1.2.4.2 Rehidratación en leche

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales de la C_{reh} de la ciruela rehidratada en leche a una temperatura de 10 °C mostrados en la Tabla 4.2. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 74 se indica en la ecuación 4.7

$$C_{reh} = 0.733 + 0.0168 x_1 + 0.00314 x_2 - 0.00812 x_3 - 0.00114 x_1 x_2 + \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$0.00691 x_1 x_3 + 0.0102 x_2 x_3 - 0.0063 x_1^2 - 0.158 x_2^2 - 0.0031 x_3^2$$

En la Figura 4.15 se ilustra la gráfica de superficie de respuesta para predecir la C_{reh} de la ciruela liofilizada y rehidratada en leche a una temperatura de 10 °C en función de las variables del proceso de liofilización estudiadas.

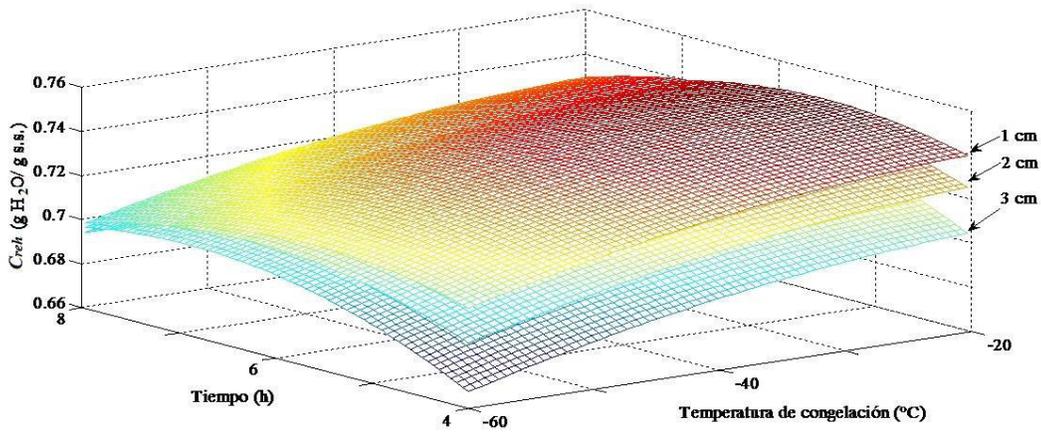


Figura 4.15 .Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 10 °C de rodajas de ciruela liofilizada.

Así mismo, los datos experimentales (Tabla 4.2) obtenidos para la C_{reh} de rodajas de ciruela rehidratadas en leche a 30 °C se utilizaron para ajustar un modelo mediante regresión lineal y poder predecir el comportamiento de la C_{reh} en función de las variables de liofilización evaluadas. El modelo matemático que resultó para la C_{reh} de la ciruela liofilizada rehidratada en leche a 30 °C con un coeficiente de correlación de 0.78 se indica en la ecuación 4.8

$$G_{reh} = 0.733 + 0.0168 x_1 + 0.00317 x_2 - 0.00812 x_3 - 0.00114 x_1 x_2 + \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$0.00691 x_1 x_3 + 0.0102 x_2 x_3 - 0.0063 x_1^2 - 0.0158 x_2^2 - 0.0031 x_3^2$$

En la Figura 4.16 se muestra la gráfica de superficie de respuesta de C_{reh} de la ciruela rehidratada en leche a 30 °C en función de la temperatura de congelación, el tiempo de liofilización y el diámetro de la muestra.

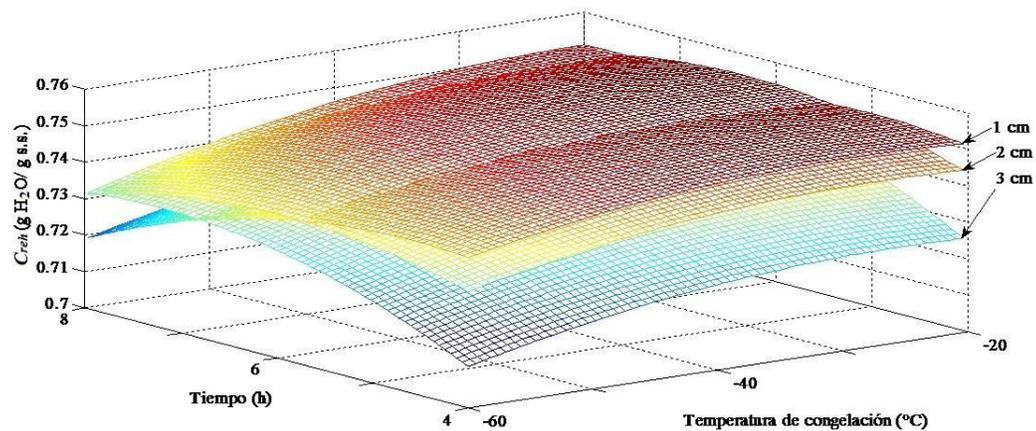


Figura 4.16 Superficie de respuesta de la capacidad de rehidratación en leche a 30 °C de rodajas de ciruela liofilizada.

El ANOVA indicó que no existe un efecto significativo de la temperatura de congelación, el tiempo de procesamiento y el diámetro de la muestra sobre el C_{reh} de las rodajas de ciruela rehidratadas en leche a una temperatura de 10 y 30 °C. No obstante, en la Figura 4.15 y 4.16 se observó una tendencia creciente de la C_{reh} a medida que aumenta la temperatura de congelación (congelación lenta) y el tiempo de procesamiento. Como se mencionó anteriormente la congelación a bajas temperaturas (-60 °C) crea poros más pequeños los cuales generan caminos estrechos, que confieren una mayor resistencia al paso del agua (Reyes *et al.*, 2011).

En general, las muestras rehidratadas en leche tiene una menor C_{reh} que las muestras rehidratadas en agua. Este comportamiento es debido a un aumento en la concentración de los medios rehidratantes, lo cual provoca un decremento en la absorción de agua en el alimento. Además en medios rehidratantes como la leche, la formación de una capa de lípidos depositada en la superficie del alimento crea una barrera para la transferencia de humedad, lo cual explica la menor hidratación en este medio (Sacchetti *et al.*, 2003). Resultados similares se observaron en la rehidratación de fresas en leche (Shih *et al.*, 2008) y de zanahoria en diferentes soluciones de almidón (Marabi y Saguy, 2005) donde la capacidad de rehidratación fue menor en comparación con las muestras rehidratadas en agua.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

La optimización del proceso de secado por charolas y liofilización de ciruela mexicana. Esto se logró empleando la metodología de superficie de respuesta, definiendo modelos matemáticos de segundo grado para relacionar las variables del secado de charolas y de liofilización de ciruela con las respuestas. De igual forma la superposición de contornos de las variables evaluadas para ambos procesos fueron eficaces para determinar las condiciones óptimas para la obtención de productos estables con un costo mínimo.

Las condiciones óptimas de operación para el secado por charolas de ciruela mexicana fueron: una temperatura de secado de 55 °C, un tiempo de secado de 4.5 h y un diámetro de muestra de 3 cm. Bajo estas condiciones se obtuvo 0.01045 kg/h de ciruela deshidratada con contenido de humedad de 0.0085 gH₂O/ g s.s. a_w de 0.346, ΔE de 12.48 y el costo del producto fue de 40.40 \$ k⁻¹. El producto obtenido presentaba un color similar al fruto fresco, además las condiciones empleadas favorecieron la baja degradación de los compuestos en la ciruela.

El análisis de las gráficas de contorno permitió obtener las condiciones óptimas para el proceso de liofilización de ciruela mexicana: temperatura de congelación de -20 °C, un tiempo de liofilización de 4.3 h y un diámetro de la muestra de 1.4 cm. Con estas condiciones, se obtuvo 0.0038 kg/h de producto liofilizado, con una a_w de 0.331, contenido de humedad de 0.0480, y ΔE de 7.65. El costo de producción de ciruela liofilizada fue de 55.88 \$ kg⁻¹. La ciruela liofilizada a las condiciones óptimas presentó valores cercanos a los predichos en los modelos de optimización.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, el secado es una alternativa adecuada para la obtención de un producto estable, donde se logró reducir la a_w a valores menores a 0.6 con lo que se descarta la posibilidad de deterioro por microorganismos, además de reducir el contenido de humedad a valores menores del 0.1 gH₂O/ g s.s.

Del estudio realizado, se concluye como más adecuado el proceso de la liofilización, ya que con este proceso se preservan mejor las propiedades ópticas (color), y se obtiene una mayor retención de los nutrientes de la ciruela (pectina, vitamina C y ácido cítrico). No obstante, este método resultó tener un costo de producción más elevado comparado con el método convencional. En el tratamiento realizado mediante el secado por charolas, aunque presentó un bajo costo de producción, los valores de ΔE (parámetro $a=10.12$) indicaron un posible decremento de pigmentos, además de que se presentó una ligera degradación de pectina en el producto lo cual indica un posible daño en la estructura de la fruta.

Respecto al análisis de rehidratación, se reporta que las rodajas de ciruela liofilizadas mostraron una mejor capacidad de rehidratación que las muestras deshidratadas en el secado por charolas. Los valores obtenidos de la capacidad de rehidratación de las rodajas deshidratadas en charolas fue en promedio de 80 – 93 %, mientras que las rodajas liofilizadas alcanzaron valores entre 92 -98 %; sin embargo, dado que las rodajas de ciruela pueden ser consumidas como snacks, la baja capacidad de rehidratación de las ciruelas deshidratadas en charolas puede ser preferida, por otra parte en el caso de las frutas adicionadas a cereales o yogurt una rápida rehidratación es necesaria, por lo cual las ciruelas liofilizadas pueden ser empleadas para este fin; dependiendo de la aplicación o características del producto final, un método de secado deberá ser seleccionado para obtener el mejor producto y así satisfaga las demandas del mercado.

En futuras investigaciones se recomienda realizar un análisis del perfil de textura de las ciruelas deshidratadas en secado por charolas y liofilización, ya que las propiedades de textura (dureza, cohesividad y elasticidad) están ligadas a la deformación y desintegración de los alimentos. De la misma forma, sería de interés la realización del análisis textural de las ciruelas secas rehidratadas en diferentes medios de inmersión (agua y leche) y a diferentes temperaturas, así como realizar un análisis sensorial para evaluar la aceptación por el consumidor de las rodajas secas rehidratadas en algún medio de inmersión.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abhayawick, L., Laguerre, J.C., Tausin, V., y Duquenoy, A. 2002. Physical properties of three onion varieties as affected by the moisture content. *Journal of Food Engineering*. **55**(3):253-262.
- Adhami, S., A. Rahimi, y M.S. Hatamipour. 2013. Freeze drying of quince (*Cydonia oblonga*): Modelling of drying kinetics and characteristics. *Korean Journal of Chemical Engineering*. **30**:1201-1206.
- Afolabi, T., Tunde-Akintunde, T., y Olanipekun, B. F. 2014. Effect of drying conditions on energy utilization during cocoyam drying. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. **16**(4):135-145.
- Agbashlo, M., Kianmehr, M.H., y Samimi-Akhijahani, H.A.D.I. 2009 Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of barberries (*Barberries vulgaris*). *Journal of Food Process Engineering*. **32**(2):278-293
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., y Hassan-Beygi, S. R. 2008. Specific heat and thermal conductivity of berberis fruit (*Berberis vulgaris*). *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. **3**(1):330-336.
- Ahmed, J., Shivhare, U. S. y Raghavan, G. S. V. 2004. Thermal degradation kinetics of anthocyanin and visual colour of plum puree. *European Food Research and Technology*. **218**(6): 525-528.
- Aktas, T., Orak, H. H., y Sahin, F. H. 2013. Effects of Different Drying Methods on Drying Kinetics and Color Parameters of Strawberry Tree (*Arbutus unedo* L.) Fruit. *JOTAF/Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*. **10**(2):1-12.
- Alia-Tecajal, I., Y.I. Astudillo-Maldonado, C.A. Núñez-Colín, L.A. Valdez-Aguilar, S. Bautista-Baños, E. García-Vázquez, R. Ariza-Flores, y F. Rivera-Cabrera. 2012. Caracterización de frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) del sur de México. *Revista de Fitotecnia Mexicana*. **35**(SPE.5): 21-26.
- Almeida, M.M.B., Sousa, P.H.M., Arriaga, A.M.C., Prado, G.M., Magalhães, C.E.C., Maia, C.A., Lemos, T.L.G., 2011. Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh exotic fruits from northeastern Brazil. *Food Research International*. **44**(7):2155–2159.
- Almeida-Trasviña, F., Medina-González, S., Ortega-Rivas, E., Salmerón-Ochoa, I., y Pérez-Vega, S. 2014. Vacuum Drying Optimization and Simulation as a Preservation Method of Antioxidants in Apple Pomace. *Journal of Food Process Engineering*. **37**(6):575-587.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., y Magee, T. R. A. 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. *Food and Bioproducts Processing*. **80**(2):118-128.
- An, K., Ding, S., Zhao, D., Wang, X., Wang, Z., y Hu, X. 2013. Response surface optimisation of osmotic dehydration of Chinese ginger (*Zingiber officinale Roscoe*) slices. *International Journal of Food Science and Technology*. **48**(1):28-34.
- Arriola-Guevara, E., García-Herrera, T., Guatemala-Morales, G.M., Nungaray-Arellano, J., González-Reynoso, O., y Ruíz-Gómez, J.C. 2006. Comportamiento del aguacate Hass liofilizado durante la operación de rehidratación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **5**(1): 51-56.
- Arslan, D., y Özcan, M. M. 2011. Drying of tomato slices: changes in drying kinetics, mineral contents, antioxidant activity and color parameters Secado de rodajas de tomate: cambios

- en cinéticos del secado, contenido en minerales, actividad antioxidante y parámetros de color. *CyTA-Journal of Food*. **9**(3):229-236.
- Asokapandian, S., Venkatachalam, S., Swamy, G. J., y Kuppusamy, K. 2016. Optimization of foaming properties and foam mat drying of muskmelon using soy protein. *Journal of Food Process Engineering*. **39**(6):692-701.
- Aviara, N. A., Onuoha, L. N., Falola, O. E., y Igbeka, J. C. 2014. Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. *Energy*. **73**:809-817.
- Awuah, G. B., Ramaswamy, H. S. y Economides, A. 2007. Thermal processing and quality: principles and overview. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. **46**, 584-602.
- Badui, D.S. 2006. Química de los alimentos. Editorial Pearson Educación. México.
- Baeghbalí, V., Niakousari, M., y Farahnaky, A. 2016. Refractance Window drying of pomegranate juice: quality retention and energy efficiency. *LWT-Food Science and Technology*. **66**:34-40.
- Balasubramanian, S., Sharma, R., Gupta, R. K., y Patil, R. T. 2011. Validation of drying models and rehydration characteristics of betel (*Piper betel* L.) leaves. *Journal of Food Science and Technology*. **48**:685-691.
- Liu, Y., Heying, E., y Tanumihardjo, S. A. 2012. History, global distribution, and nutritional importance of citrus fruits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. **11**(6): 530-545.
- Ibarz A., y Barbosa-Cánovas., G. 2010. Unit Operations in food Engineering. CRC Press. USA.
- Barbosa-Cánovas, G. y Vega-Mercado, H. 1996. Dehydration of foods. International Thomson Publishing. USA.
- Barbosa-Cánovas, G., Fontana Jr., A.J., Schmidt, S.J. y Labuza, T.P. 2007. Water activity in foods. IFT press. Blackwell Publishing. USA.
- Barreiro, M.J.A. y Sandoval, B.A.J. 2006. Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Editorial Equinoccio. Caracas, Venezuela.
- Baş, D., y Boyacı, İ. H. 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of food engineering*, **78**(3):836-845.
- Nath, A., y Chattopadhyay, P. K. 2007. Optimization of oven toasting for improving crispness and other quality attributes of ready to eat potato-soy snack using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*. **80**(4): 1282-1292.
- Bautista-Baños, S., Díaz-Pérez, J.C., Barrera-Necha, L.L. y Bravo-Luna, L. 2003. Postharvest study of red-mombin (*Spondias purpurea* L.) fruit during storage. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. Asociación Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, S.C.* Hermosillo, México. **5**(2):82-85.
- Bchir, B., Besbes, S., Karoui, R., Attia, H., Paquot, M. y 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.
- Beaudry, C., Raghavan, G.S.V., Ratti, C., y Rennie, T.J. 2004. Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. *Drying Technology*. **21**(9): 1797-1810.
- Benlloch-Tinoco, M., Moraga, G., del Mar Camacho, M., y Martínez-Navarrete, N. 2013. Combined drying technologies for high-quality kiwifruit powder production. *Food and Bioprocess Technology*. **6**(12):3544-3553.

- Bera, M., Chakraborty, R., y Bhattacharya, P. 2012. Optimization of intensification of freeze-drying rate of banana: Combined applications of IR radiation and cryogenic freezing. *Separation Science and Technology*. **48**(2):346-358.
- Bon, J., Vázquez, H., Benedito, J., y Telis-Romero, J. 2010. Thermophysical properties of mango pulp (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins). *Journal of Food Engineering*. **97**(4):563-568.
- Calín-Sánchez, Á., Figiel, A., Szarycz, M., Lech, K., Nuncio-Jáuregui, N., y Carbonell-Barrachina, Á. A. 2014. Drying kinetics and energy consumption in the dehydration of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils and rind. *Food and Bioprocess Technology*. **7**(7):2071-2083.
- Caliskan G, y Dirim S. N. 2017 Drying characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices in convective and freeze dryer. *Heat Mass Transfer* 1-13.
- Economos, C., and Clay, W. D. 1999. Nutritional and health benefits of citrus fruits. *Energy*: **62**(78): 37
- Calvo, C. y Duran, L. 1997. Propiedades físicas II, Temas de tecnología de alimentos. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C.I., Sablani, S.S., Powers, J.R., y Fallman, J.K. 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering*. **11**(1):135-148.
- Carrillo-Navas, H., González-Rodea, D. A., Cruz-Olivares, J., Barrera-Pichardo, J. F., Román-Guerrero, A., y Pérez-Alonso, C. 2011. Estabilidad durante el almacenamiento y propiedades físicoquímicas de microcápsulas de jugo de maracuyá obtenidas mediante secado por aspersión. *Revista mexicana de Ingeniería Química*. **10**(3)421-430.
- Ceballos, A. M., Giraldo, G. I., y Orrego, C. E. 2012. Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp. *Journal of Food Engineering*. **111**(2): 360-365.
- Chakraborty, R., Bera, M., Mukhopadhyay, P., y Bhattacharya, P. 2011. Prediction of optimal conditions of infrared assisted freeze-drying of aloe vera (*Aloe barbadensis*) using response surface methodology. *Separation and Purification Technology*. **80**(2):375-384.
- Chakraborty, R., Saha, A. K., y Bhattacharya, P. 2006. Determination of thermo-physical properties of freeze-dried foodstuffs. *Indian Journal of Chemical Technology*. **13** (2013):597-604.
- Chan, S. Y., y Choo, W. S. 2013. Effect of extraction conditions on the yield and chemical properties of pectin from cocoa husks. *Food Chemistry*. **141**(4):3752-3758.
- Chavez-Gutierrez, J. Muñoz-López C., Cantu-Lozano, D. Luna-Solano, L. 2017. Deep-freezing process and lyophilization of vegetal pear (*Sechium edule*). International Food and Technologist, IFT-2017.Las vegas-USA.
- Chen, Y. y Martynenko, A. 2013. Computer vision for real-time measurements of shrinkage and color changes in blueberry convective drying. *Drying Technology*. **31**(10):1114-1123.
- Chin, S.K., y Law, C.L. 2010. Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of *Ganoderma tsugae* Murrill. *Drying Technology*. **28**(12):1457-1465.
- Chong, C. H., Law, C. L., Cloke, M., Hii, C. L., Abdullah, L. C., y Daud, W. R. W. 2008. Drying kinetics and product quality of dried Chempedak. *Journal of Food Engineering*. **88**(4):522-527.
- Cinquanta, L., Di Matteo, M., y Esti, M. 2002. Physical pre-treatment of plums (*Prunus domestica*). Part 2. Effect on the quality characteristics of different prune cultivars. *Food Chemistry*. **79**(2):233-238.

- Ciurzyńska A, Lenart A 2011 Freeze-drying-application in food processing and biotechnology-a review. *Polish Journal of Food Nutrition and Science*. **61**:165-171.
- Ciurzyńska, A., Mieszkowska, A., Olsiński, I., y Lenart, A. 2017. The effect of composition and aeration on selected physical and sensory properties of freeze-dried hydrocolloid gels. *Food Hydrocolloids*. **67**:94-103.
- Contreras C, Martín-Esparza ME, Martínez y -Navarrete N .2012. Influence of drying method on the rehydration properties of apricot and apple. *Journal of Food Process Engineering*, **35**:178-190.
- Contreras, C., Martín-Esparza, M.E. Chiralt, A., y Martínez-Navarrete, N. 2008. Influence of microwave application on convective drying: effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering*. **88**(1):55-64.
- Corrêa, S. C., Clerici, M. T. P. S., Garcia, J. S., Ferreira, E. B., Eberlin, M. N., y Azevedo, L. 2011. Evaluation of dehydrated marolo (*Annona crassiflora*) flour and carpels by freeze-drying and convective hot-air drying. *Food Research International*. **44**(7): 2385-2390.
- Cortés, S, M., Herrera, E., y Rodríguez, E. 2015. Experimental optimization of the freeze dry process of cape gooseberry added with active compounds by vacuum impregnation. *Vitae*. **22**(1):47-56.
- Corzo, O., Bracho, N., Vásquez, A., y Pereira, A. 2008. Optimization of a thin layer drying process for coroba slices. *Journal of Food Engineering*. **85**(3):372-380.
- Delgado, T., Pereira, J. A., Casal, S., y Ramalhosa, E. 2016. Effect of drying on color, proximate composition and drying kinetics of sliced chestnuts. *Journal of Food Process Engineering*. **39**(5): 512-520.
- Dirim SN, y Çaliskan G. 2012. Determination of the effect of freeze drying process on the production of pumpkin (*Cucurbita moschata*) puree powder and the powder properties. *Journal of Food*, 37:203-210.
- Domínguez-Niño, A., Buendía-González, A. N., Cantú-Lozano, D., Andrade-González, I., y Luna-Solano, G. 2016. Efecto del secado por lecho fluidizado sobre las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de queso fresco mexicano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **15**(3):869-881
- Domínguez-Niño, A., Cantú-Lozano, D., Ragazzo-Sanchez, J. A., Andrade-González, I., y Luna-Solano, G. 2017. Energy requirements and production cost of the spray drying process of cheese whey. *Drying Technology*. 1-12.
- Donsi, G., Ferrari, G., y Nigro, R. 1996. Experimental de termination of thermal conductivity of apple and potato at different moisture contents. *Journal of Food Engineering*. **30**(3):263-268.
- Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. **78**(4):1291-1297.
- Doymaz, İ. 2013. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. *International Journal of Food Science and Technology*. **48**(9):1909-1915.
- Erbay, Z., y Icier, F. 2009. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*. **91**(4):533-541.
- Erenturk, S., Gulaboglu, M. S., y Gultekin, S. 2005. The effects of cutting and drying medium on the vitamin C content of rosehip during drying. *Journal of Food Engineering*. **68**(4):513-518.

- Ergün K. Çalışkan G. y Dirim SN. 2016 Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (*Actinidia deliciosa*) slices. *Heat Mass Transfer*. **52**:2697-2705
- Espinoza-Guevara, R., Caro-Corrales, J., Ordorica-Falomir, C., Zazueta-Morales, J., Vega-García, M., y Cronin, K. 2010. Thermophysical properties of pulp and rind of papaya cv. Maradol. *International Journal of Food Properties*. **13**(1):65-74.
- Fang, S., Wang, Z., Hu, X., Chen, F., Zhao, G., Liao, X., y Zhang, Y. A. N. 2011. Energy requirement and quality aspects of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in hot air drying followed by microwave drying. *Journal of Food Process Engineering*. **34**(2):491-510.
- Fante, L., y Noreña, C. P. Z. 2015. Quality of hot air dried and freeze-dried of garlic (*Allium sativum* L.). *Journal of Food Science and Technology*. **52**(1):211-220.
- Foust, S.A., Wensel, A.L., Clump, W.C., Maus, L., Andersen, L.B. 2006. Principios de las operaciones unitarias. Editorial CECSA. México.
- Franceschinis, L., Sette, P., Schebor, C., y Salvatori, D. 2015. Color and bioactive compounds characteristics on dehydrated sweet cherry products. *Food and Bioprocess Technology*. **8**(8):1716-1729.
- Fricke, B. A. y Becker, B.R. 2001. Evaluation of thermophysical property models for foods. *HVCA&R Research*. **7**(4):311-330.
- Coimbra, J. S., Gabas, A. L., Minim, L. A., Rojas, E. E. G., Telis, V. R., y Telis-Romero, J. 2006. Density, heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products. *Journal of Food Engineering*. **74**(2): 186-190.
- Gabas, A.L., Marra-Júnior, W.D., Telis-Romero, J., y Telis, V.R.N. 2005. Changes of density, thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat of plums during drying. *International Journal of Food Properties*. **8**(2): 233-242.
- García-Segovia P, Andrés-Bello A, y Martínez-Monzó J 2011 Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. *LWT-Food Science and Technology*.
- Geankoplis, C.J. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias. CECSA. México.
- George, J. P., y Datta, A. K. 2002. Development and validation of heat and mass transfer models for freeze-drying of vegetable slices. *Journal of Food Engineering*. **52**(1): 89-93.
- Goula, A. M., y Adamopoulos, K. G. 2006. Retention of ascorbic acid during drying of tomato halves and tomato pulp. *Drying Technology*. **24**(1):57-64.
- Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikantan, M.R., y Ilyas, S.M. 2007. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*. **79**(1):176-180.
- Greiby, I., Siddiq, M., Dolan, K. D. y Kelkar, S. 2013. Effect of non-isothermal processing and moisture content on the anthocyanin degradation and colour kinetics of cherry pomace. *International Journal of Food Science and Technology*. **48**(5):992-998.
- Guerrero-Beltrán, J. A., Ruiz-Hernández, F., y Welti-Chanes, J. 2015. Mexican Plum (*Spondias purpurea* L.) Moisture Sorption Properties. En: *Water Stress in Biological, Chemical, Pharmaceutical and Food Systems* . Springer New York.
- Gupta, M. K., Sehgal, V. K., y Arora, S. 2013. Optimization of drying process parameters for cauliflower drying. *Journal of Food Science and Technology*. **50**(1):62-69.
- Hammami, C., y René, F. 1997. Determination of freeze-drying process variables for strawberries. *Journal of Food Engineering*. **32**(2):133-154.

- Harnkarnsujarit N, Kawai, K, Watanabe, M, y Suzuki, T. 2016. Effects of freezing on microstructure and rehydration properties of freeze-dried soybean curd. *Journal of Food Engineering*. **184**:10-20.
- Kuehl, R. O. 2001. Diseño de experimentos. Segunda edición. Thomson Learning. México D.F.
- Hawladar, M. N. A., Perera, C. O., Tian, M., y Yeo, K. L. 2006. Drying of guava and papaya: Impact of different drying methods. *Drying Technology*. **24**(1):77-87.
- Henríquez, M., Almonacid, S., Lutz, M., Simpson, R., y Valdenegro, M. 2013. Comparison of three drying processes to obtain an apple peel food ingredient. *CyTA-Journal of Food*. **11**(2):127-135.
- Huang, L. L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Sun, D. F., Tan, G. W., y Tang, S. 2009. Studies on decreasing energy consumption for a freeze-drying process of apple slices. *Drying Technology*. **27**(9):938-946.
- Hunterlab. 2012. www.hunterlab.com.
- Ihns, R., Diamante, L. M., Savage, G. P., y Vanhanen, L. 2011. Effect of temperature on the drying characteristics, colour, antioxidant and beta-carotene contents of two apricot varieties. *International Journal of Food Science and Technology*. **46**(2):275-283.
- Ioannou, I., Guiga, W., Charbonnel, C., y Ghoul, M. 2011. Frozen Mirabelle plum drying: kinetics, modelling and impact on biochemical properties. *Food and Bioprocess Processing. IChemE*. **89**(4):438-448.
- Ishwarya, S. P. y Anandharamakrishnan, C. 2015. Spray-Freezing-Drying approach for soluble coffee processing and its effect on quality characteristics. *Journal of Food Engineering* **149**:171-180.
- Ismail, N.S. M., Ramli N., Hani, N.M., y Meon, Z. 2012. Extraction and characterization of pectin from dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) using various extraction conditions. *Sains Malaysiana*. **41**(1):41-45.
- Jangam, S.V., Law, C.L., y Mujumdar, A.S., 2010. Drying of foods, vegetables and fruits Volume 1. (E-book, ISBN 978-981-08-6759-1). Singapore.
- Fante, C., Corrêa, J., Natividade, M., Lima, J., y Lima, L. 2011. Drying of plums (*Prunus sp*, cv Gulfblaze) treated with KCl in the field and subjected to pulsed vacuum osmotic dehydration. *International Journal of Food Science and Technology*. **46**(5): 1080-1085.
- Janick, J. y Paull, R.E. 2008. The encyclopedia of fruits and nuts. CABI. London. England.
- Jaworska, G., Pogoń, K., Bernaś, E., y Skrzypczak, A. 2014. Effect of different drying methods and 24-month storage on water activity, rehydration capacity, and antioxidants in *Boletus edulis* mushrooms. *Drying Technology*. **32**(3):291-300.
- Jiang, H., Zhang, M., Liu, Y., Mujumdar, A. S., y Liu, H. 2013. The energy consumption and color analysis of freeze/microwave freeze banana chips. *Food and Bioprocess Processing*. **91**(4):464-472.
- Jibril, A.N.; YAdak, K.C., Binni, M.I., y Kabir, M.H. 2016. Study on effect of moisture content on thermal properties of Bambara groundnut (*Vignasubterrea* L. Verdc.) seed. *International Research Journal of Engineering and Technology*. **3**(7):773-782.
- Jokic, S., Mujic, I., Martinov, M., Velic, D., Bilic, M., y Lukinac J. 2009. Influence of drying procedure on colour and rehydration characteristic of wild asparagus. *Czech Journal of Food Science*. **27**(3):171-177.

- Kaletunç, G. 2007. Prediction of specific heat of cereal flours: A quantitative empirical correlation. *Journal of food engineering*, **82**(4):589-594.
- Khalloufi, S., R., J. L., y Ratti, C. 2005. Solid foods freeze-drying simulation and experimental data. *Journal of Food Process Engineering*. **28**(2):107-132.
- Kim, M. S., Kang, J. H., Chung, K. S., Won, M., y Song, K. B. 2013. Effects of dehydrating agents on the physicochemical properties of dried plum (*Prunus salicina* L.) slices. *Journal of Applied Biological Chemistry*. **56**(1):19-22.
- Kliemann, E., K. Nunes de Simas, E.R. Amante, E.P. Schwiden, R.F. Teófilo, M.M.C. Ferreira, and R.D.M.C. Amboni. 2009. Optimization of pectin acid extraction from passion fruit peel (*Passiflora edulis flavicarpa*) using response surface methodology. *International Journal of Food Technology*. **44**:476-483.
- Kozanoglu, B., Martinez, J., Alvarez, S., Guerrero-Beltrán, J. A., y Welti-Chanes, J. 2012. Influence of particle size on vacuum-fluidized bed drying. *Drying technology*. **30**(2):138-145.
- Krokida, M.K. y Marinos-Kouris, D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*. **57**: 1-7.
- Law, C.L. y Mujumdar, A.S. 2014. Fluidized bed dryers. En: *Handbook of Industrial Drying*, (A.S. Mujumdar, ed.), Pp. 161-189. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Lewicki, P. P. 1998. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties*. **1**(1):1-22.
- Lewicki, P.P., y Duszczuk, E. 1998. Color change of select vegetables during convective air drying. *International Journal of Food Properties*. **1**(3):263-273.
- Lewicki, P.P. 2004. Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering*. **61**(4):483-495.
- Li, R., Huang, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., y Wang, Y. C. 2014. Freeze drying of apple slices with and without application of microwaves. *Drying Technology*. **32**(15):1769-1776.
- Liapis, A.I., y R. Bruttini. 2006. Freeze Drying. In: Mujumdar, A. (ed). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, Boca Raton. pp: 257-281.
- Lim, T.K. 2012. Edible medicinal and non-medicinal plants. Volume 1 Fruits. Springer. New York, USA.
- Lins, A. D., Rocha, A., Gomes, J. P., Feitosa, R. M., Araujo, G. T., y Santos, D. D. C. 2017. Adsorption isotherms of the red mombin powder produced in spouted bed dryer. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. **21**(8), 562-567.
- López-Quiroga, E., Antelo, L. T., y Alonso, A. A. 2012. Time-scale modeling and optimal control of freeze-drying. *Journal of Food Engineering*. **111**(4):655-666.
- Lozano-Acevedo, A., Jimenez-Fernandez, M., Ragazzo-Sanchez, A., Urrea-Garcia, G. R. y Luna-Solano, G. 2011. Fluidized bed drying process of thinly sliced potato (*Solanum tuberosum*). *American Journal of Potato Research*. **88**(4):360-366.
- Luna-Solano, G., Salgado-Cervantes, M. A., Rodriguez-Jimenes, G. C., y Garcia-Alvarado, M. A. 2005. Optimization of brewer's yeast spray drying process. *Journal of Food Engineering*. **68**(1):9-18.
- Luo, R., y Zhou, G. 2008. Mathematical optimization for energy consumption during freeze-drying of cooked beef slice. *Journal of Food Process Engineering*. **31**(5): 583-601.

- Madamba, P. S. 2002. The response surface methodology: an application to optimize dehydration operations of selected agricultural crops. *LWT-Food Science and Technology*. **35**(7), 584-592.
- Mahapatra, A. K., Melton, S. L. y Isang, E. M. 2013. Effect of moisture content on thermal properties of cowpea flours. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. **15**(2): 251-255.
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Alia-Tejacal, I., Núñez-Colín, C. A., Jiménez-Hernández, J., Pelayo-Zaldívar, C., López-Martínez, V., Andrade-Rodriguez, M., Bautista-Baños, S. y Valle-Guadarrama, S. 2014. Postharvest physiology and technology of *Spondias purpurea* L. and *S. mombin* L. *Scientia Horticulturae*. **174**(2014):193-206.
- Marabi A, Jacobson M, Livings SJ, Saguy I.S .2004. Effect of mixing and viscosity on rehydration of dry food particulates. *European Food Research and Technology*. **218**:339-344.
- Marabi, A., y Saguy, I. S. 2005. Viscosity and starch particle size effects on rehydration of freeze-dried carrots. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **85**(4): 700-706.
- Marín, B.E., Lemus, M. R., Flores, M. V., y Vega, G.A. 2006. La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*. **33**(3): 527-538.
- Marques, L. G., Silveira, A. M., y Freire, J. T. 2006. Freeze-drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology*. **24**(4):457-463.
- Marques, L.G., M.C. Ferreira, y J.T. Freire, 2007. Freeze-drying of acerola (*Malpighia glabra* L.) *Chemical. Engineering. Process*. **46**:451-457.
- Marquez, A., Pérez-Serratos, M., y Mérida, J. 2013. Anthocyanin evolution and color changes in red grapes during their chamber drying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **61**(41):9908-9914
- Mastrocola, D., Dalla Rosa, M., y Massini, R. 1997. Freeze-dried strawberries rehydrated in sugar solutions: mass transfers and characteristics of final products. *Food Research International*. **30**(5):359-364.
- Maupoey Fito, J., Grau Andres, A.M., Albors Sorolla, A.M., y Barat Baviera, J.M. 2001. Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Editorial de la Universidad Autónoma de Valencia. Valencia, España.
- Meda L, y Ratti C .2005. Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures *Journal of Food Process Engineering*. **28**:233-246.
- Melquíades, Y.I., López C., y Rosas, M. E. 2009. Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus carota*) deshidratadas. *Información Tecnológica*. **20**(3):65-72.
- Mendoza, S.J.C. 2009. Aporte a las actividades de la oficina de planificación municipal de Santa Mita, Jutiapa. Trabajo de graduación. Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Mercali, G. D., Sarkis, J. R., Jaeschke, D. P., Tessaro, I. C., y Marczak, L. D. F. 2011. Physical properties of acerola and blueberry pulps. *Journal of Food Engineering*. **106**(4):283-289.
- Michalska, A., Wojdyło, A., Lech, K., Łysiak, G. P., y Figiel, A. 2016. Physicochemical properties of whole fruit plum powders obtained using different drying technologies. *Food chemistry*. **207**(2016):223-232.
- Monsoor, M.A. 2005. Effect of drying methods on the functional properties of soy hull pectin. *Carbohydrate Polymers*. **61**(3):362-367.
- Montalvo-González, E., García, H. S., Mata-Montes de Oca, M., y Tovar-Gómez, B. 2011. Efecto de la luz en ciruela mexicana manejada en diferentes condiciones de almacenamiento

- Effect of light on Mexican plum stored under different storage conditions. *CyTA-Journal of Food*. **9**(1):65-70
- Montgomery, D.C. 2005. Diseño de experimentos. Segunda edición. Editorial Limusa-Wiley, México D.F.
- Morales-Delgado, D.Y., Téllez-Medina, D.I., Rivero-Ramírez, N. L., Arellano-Cárdenas, S., López-Cortez, S., Hernández-Sánchez, H., Gutiérrez-López, G., y Cornejo-Mazón, M. 2014. Effect of convective drying in total anthocyanin content, antioxidant activity and cell morphometric parameters of strawberry parenchymal tissue (*Fragaria x ananassa Dutch*). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **13**(1):179-187.
- Moreira, R., Chenlo, F., Chaguri, L., y Fernandes, C. 2008. Water absorption, texture, and color kinetics of air-dried chestnuts during rehydration. *Journal of Food Engineering*, **86**(4):584-594.
- Mujaffar, S., y Lee Loy, A. 2017. The rehydration behavior of microwave-dried amaranth (*Amaranthus dubius*) leaves. *Food science and nutrition*. **5**(3): 399-406.
- Murcia MA, López-Ayerra B, Martínez-Tomé M, Vera AM, García-Carmona F. 2000. Evolution of ascorbic acid and peroxidase during industrial processing of broccoli. *Journal of Food Science Agriculture*. **80**:1882-1886.
- Muy, R.M.D., Báez, S.M., Contreras, M.R., Pérez, R.V., Martínez, R.C., Contreras, A.L., Rubio, C.W., Sánchez, V.E., Osuna, E.T., Vélez de la Rocha R., y Sañudo, B.A. 2010. Calidad de ciruela roja mexicana deshidratada mediante sol y calor seco. SAGARPA-Centro de investigación en alimentos y desarrollo (CIAD), Unidad Culiacán-Fundación Produce Sinaloa A.C. México.
- Noche, C.F., Cantre, D.V., y Flores, F.P. 2011. Effect of pretreatment and geometry on the thermophysical properties of raw ubi (*Dioscorea alata L.*). *Philippine Science Letters*. **4**(1):40-45.
- Nuñez-Galindo, Y. 2016. Secado por aspersión de pulque proveniente de *Agave salmiana*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. Orizaba, México.
- Oliveira, A.R.F. y Ilincanu, L. 1999. Rehydration of dried plant tissue. En Processing of foods, quality and optimization and process assessments. Ed: Oliveira, J.C. CRC Press, London, UK. pp 201–227.
- Orrego, A.C.E. 2003. Procesamiento de alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Colombia.
- Osuna, G.J.A., Pérez, B.M.H., Vázquez, V.V. y Gómez, J.R. 2011. Aplicación de 1-metilciclopropeno (1-MCP) y su efecto en ciruela mexicana (*Spondias purpurea L.*). *Revista Fitotecnia Mexicana*. **34**(3):197-204.
- Otero L, Martino M, Zaritzky N, y Solas M, Sanz P.D. 2000. Preservation of microstructure in peach and mango during high-pressure-shift freezing. *Journal of Food Science*. **65**:466-470.
- Özkan, M., Kirca, A., y Cemeroğlu, B. 2003. Effect of moisture content on CIE color values in dried apricots. *European Food Research and Technology*. **216**(3): 217-219.
- Pardo, J. M., y Leiva, D. A. 2010. Effects of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. *Interciencia*. **35**(12):934-398.
- Pei, F., Y. Shi, A.M. Mariga, W. J. Yang, X.Z. Tang, L.Y. Zhao, X.X. An, y Q.H. Hu. 2014a. Comparison of freeze-drying and freeze-drying combined with microwave vacuum drying

- methods on drying kinetics and rehydration characteristics of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. *Food and Bioprocess Technology*. **7**(3): 1629-1639.
- Pei, F., Yang, W. J., Shi, Y., Sun, Y., Mariga, A. M., Zhao, L. Y., and Hu, Q. H. 2014b. Comparison of freeze-drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. *Food and Bioprocess Technology*. **7**(3): 702-710.
- Pérez-Árias, G.L., Alia-Tejacal, I., Andrade-Rodríguez, M., López-Martínez, V., Pérez-López, A., Ariza-Flores, R., Otero Sánchez, M.A. y Villareal-Fuentes, J.M. 2008. Características físicas y químicas de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) en Guerrero. *Investigación Agropecuaria*. **5**(2):141-149.
- Pérez López, A., Saucedo Veloz, C., Arévalo Galarza, M. D. L., y Muratalla Lúa, A. 2004. Efecto del grado de madurez en la calidad y vida postcosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*. **27**(2):133-139.
- Pérez-Francisco, J. M., Cerecero-Enríquez, R., Andrade-González, I., Ragazzo-Sánchez, J. A., y Luna-Solano, G. 2008. Optimization of vegetal pear drying using response surface methodology. *Drying Technology*, **26**(11):1401-1405.
- Perussello, C. A., Camargo do Amarante, A. C. y Mariani, V. C. 2009. Convective drying kinetics and darkening of okara. *Drying Technology* **27**(10):1132-1141.
- Phomkong, W., Szrednicki, G. y Driscoll, R. H. 2006. Thermophysical properties of stone fruit. *Drying Technology*. **24**(2):195-200.
- Rajkumar, P., Kulanthaisami, S., Raghavan, G. S. V., Gariépy, Y., y Orsat, V. 2007. Drying kinetics of tomato slices in vacuum assisted solar and open sun drying methods. *Drying Technology*. **25**(7-8):1349-1357.
- Ramírez-Hernández, B.C., Pimienta-Barríos, E., Castellanos-Ramos, J.Z., Muñoz-Arias, A. y Palomino-Hasbach, G. 2008. Sistema de producción *Spondias purpurea* L. (*Anacardiaceae*) en el centro-occidente de México. *Revista de Biología Tropical* **56**(2):675-687.
- Ramírez-Navas, J.S. 2006. Liofilización. Editorial Recitela. Bogotá, Colombia.
- Ratti, C. 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*. **49**(4):311-319.
- Ratti, C. 2009. Advances in food dehydration. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Reyes, A., Evseev, A., Mahn, A., Bubnovich, V., Bustos, R., y Scheuermann, E. 2011. Effect of operating conditions in freeze-drying on the nutritional properties of blueberries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. **62**(3):303-306.
- Reyes, A., Vega, R., Bustos, R. y Araneda, C. 2008. Effect of Processing Conditions on Drying Kinetics and Particle Microstructure of Carrot. *Drying Technology*. **26**(10):1272-1285.
- Rhim JW, Koh S, Kim JM. 2011. Effect of freezing temperature on rehydration and water vapor adsorption characteristics of freeze-dried rice porridge. *Journal of Food Engineering*. **104**:484-491.
- Rodríguez, M.M., Gori, M.M., Mascheroni, R.H. y Pagano, A.M. 2010. Modeling of dehydration kinetics of European plums (*Prunus domestica* L.) by combined methods. 17th International Drying Symposium, Magdeburg, Alemania.

- Rosas, H. A., Baez, S.O., Urrea, G.G.R., Luna S. G. 2011. Experimental and neural network prediction of a tray dryer for drying vegetable pear. Proceedings of 11th. International Congress on Engineering and Food, Editor G. Saravacos, Athens, Greece.
- Ruenes-Morales, M.R., Casas, A., Jiménez-Osorio, J.J. y Caballero, J. 2010. Etnobotánica de *Spondias purpurea* L. (*Anacardiaceae*) en la península de Yucatán. *Interciencia*. **35**(4):247-254.
- Sablani, S. S. 2006. Drying of fruits and vegetables: retention of nutritional/functional quality. *Drying Technology*. **24**(2):123-135.
- Sacchetti, G., Pittia, P., Biserni, M., Pinnavaia, G. G. y Rosa, M. D. 2003. Kinetic modelling of textural changes in ready-to-eat breakfast cereals during soaking in semi-skimmed milk. *International Journal of Food Science and Technology* **38**: 135-143.
- Santos, P. H. S., y Silva, M. A. 2008. Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables—A review. *Drying Technology*. **26**(12):1421-1437.
- Scher, C. F., De Oliveira Rios, A. y Noreña, C. P. Z. 2009. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science and Technology*. **44**(11):2169-2175.
- Serna-Cock, L., Vargas-Muñoz, D. P., y Aponte, A. A. 2015. Structural, physical, functional and nutraceutical changes of freeze-dried fruit. *African Journal of Biotechnology*. **14**(6):442-450.
- Serpil, S. y Servet, G.S. 2006. Physical properties of foods. Springer. New York, USA.
- Sharma, S.K., Mulvaney, S.J. y Rizvi, S.S.H. 2003. Ingeniería de alimentos, operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Ed. Limusa Wiley. México.
- Shih, C., Pan, Z., McHugh, T., Wood, D., y Hirschberg, E. 2008. Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries. *Transactions of the ASABE*. **51**(1):205-216.
- Shishegarha, F., Makhlof y Ratti C. 2002 Freeze-drying characteristics of strawberries. *Drying Technology*. **20**(1):131-145.
- Shofian, N. M., Hamid, A. A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Pak Dek, M. S., y Hairuddin, M. R. 201). Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. *International Journal of Molecular Sciences*. **12**(7), 4678-4692.
- SIAP (Servicio de información agroalimentaria y pesquera). Ciclos: Cíclicos y perennes 2016. www.siap.gob.mx (Consulta: Agosto 2017).
- Singh, P. y Heldman, D. 2009. Introducción a la ingeniería de alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
- Solórzano-Morán, S., Alia-Tejacal, I., Rivera-Cabrera, F., López-Martínez, V., Pérez-Flores, L. J., Pelayo-Zaldívar, C. y Maldonado-Astudillo, Y. I. 2015. Quality attributes and functional compounds of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) fruit ecotypes. *Fruits*. **70**(5):261-270.
- Sturm, B., Hofacker, W. C., y Hensel, O. 2012. Optimizing the drying parameters for hot-air-dried apples. *Drying Technology*. **30**(14):1570-1582.
- Tansakul, A., y Lumyong, R. 2008. Thermal properties of straw mushroom. *Journal of Food Engineering*. **87**(1):91-98.
- Tarhan. 2007. Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying air temperatures. *Journal of Food Engineering*. **79**(1):255-260.
- Theppaya, T., y Prasertsan, S. 2004. Optimization of rubber wood drying by response surface method and multiple contour plots. *Drying technology*, **22**(7):1637-1660.

- Todisco, K. M., Castro-Alves, V. C., Garruti, D. D. S., Costa, J. M. C. D., y Clemente, E. 2014. The Use of Headspace Solid-Phase Microextraction (HS-SPME) to Assess the Quality and Stability of Fruit Products: An Example Using Red Mombin Pulp (*Spondias purpurea* L.). *Molecules*. **19**(10):16851-16860.
- Tripathy, P. P., y Kumar, S. 2009. Influence of sample geometry and rehydration temperature on quality attributes of potato dried under open sun and mixed-mode solar drying. *International Journal of Green Energy*. **6**(2):143-156.
- UNAL. 2012. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/ICN>.
- Valencia, C.S.Y. Rodríguez, H.L.F., y Giraldo, P.G.A. 2011. Cinética de la deshidratación y control de la oxidación en manzana Granny Smith, mediante la aplicación de diferentes métodos de secado. *Ciencias-Químicas*. **6**:7-16.
- Vangdal, E., Picchi, V., Fibiani, M., y Scalzo, R. L. 2017. Effects of the drying technique on the retention of phytochemicals in conventional and organic plums (*Prunus domestica* L.). *LWT-Food Science and Technology*. **85**:506-509.
- Vargas-Simón, G., Hernández-Cupil, R. y Moguel-Ordoñez, E. 2011. Caracterización morfológica de ciruela (*Spondias purpurea* L.) en tres municipios del estado de Tabasco, México. *Bioagro*. **23**(2):141-149.
- Vázquez-Chávez, L., y Vizcarra-Mendoza, M. 2008. Secado por Lecho Fluidizado del trigo y su calidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **7**(2):131-144.
- Velardi, S. A., y Barresi, A. A. 2008. Development of simplified models for the freeze-drying process and investigation of the optimal operating conditions. *Chemical Engineering Research and Design*. **86**(1):9-22.
- Vergeldt, F.J., van Dalen., G, Duijster, A.J., Voda, A., Khalloufi, S., van Vliet, L.J, Van As H, van Duynhoven, J.P.M., van der Sman, R.G.M. 2014 Rehydration kinetics of freeze-dried carrots. *Innovative Food Science Emerging Technology* **24**:40-47.
- Villalpando-Guzman, J., Herrera-López, E. J., Amaya-Delgado, L., Godoy-Zaragoza, M. A., Mateos-Díaz, J. C., Rodríguez-González, J., y Jaubert-Garibay, S. 2011. Efecto del secado complementario con microondas sobre tres formas de rebanadas de mango. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **10**(2):281-290.
- Villegas-Santiago, J., Calderón-Santoyo, M., Ragazzo-Sánchez, A., Salgado-Cervantes, M. A. and Luna-Solano, G. 2011. Fluidized bed and tray drying of thinly sliced mango (*Mangifera indica*) pretreated with ascorbic and citric acid. *International Journal of Food Science and Technology* **46**:1296-1302.
- Vishwanathan, K. H., Hebbar, H. U., y Raghavarao, K. S. M. S. 2010. Hot air assisted infrared drying of vegetables and its quality. *Food Science and Technology Research*. **16**(5):381-388.
- Wang, N., y Brennan, J. G. 1992. Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. *Journal of Food Engineering*. **17**(2):153-160.
- Zura-Bravo L, Ah-Hen K, Vega-Gálvez A, García-Segovia P, Lemus-Mondaca R .2013 Effect of rehydration temperature on functional properties, antioxidant capacity and structural characteristics of apple (Granny Smith) slices in relation to mass transfer kinetics. *Journal of Food Process Engineering*. **36**:559-571.