

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCION I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“PROCESO DE ULTRACONGELACIÓN Y LIOFILIZACIÓN DE CHAYOTE
(*Sechium edule*)”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

I.Q. Josefina Chávez Gutiérrez

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Guadalupe Luna Solano

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Denis Cantú Lozano



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Orizaba

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA: 23/02/2017
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. JOSEFINA CHAVEZ GUTIERREZ
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"PROCESO DE ULTRACONGELACION Y LIOFILIZACION DE CHAYOTE (SECHIUM EDULE) " .

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA

ggc



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Teléfonos: (272) 7 24 40 96 Fax. (272) 7 25 17 28

e-mail: Orizaba@itorizaba.edu.mx www.itorizaba.edu.mx



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Orizaba

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA : 16/02/2017

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

JOSEFINA CHAVEZ GUTIERREZ

la cual lleva el título de:

"PROCESO DE ULTRACONGELACION Y LIOFILIZACION DE CHAYOTE (SECHIUM EDULE)".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO

SECRETARIO : DR. DENIS CANTU LOZANO

VOCAL : DRA. ROSALIA CERECERO ENRIQUEZ

VOCAL SUP. : DR. GALO RAFAEL URREA GARCIA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I Tesis



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Teléfonos: (272) 7 24 40 96 Fax. (272) 7 25 17 28

e-mail: Orizaba@itorizaba.edu.mx www.itorizaba.edu.mx



AGRADECIMIENTOS

Doctora Guadalupe Luna Solano

Doctora, le agradezco mucho que me permitiera pertenecer a su gran equipo de trabajo, por su confianza tuve la oportunidad de lograr esta meta tan importante en mi vida y de conocer a excelentes amigos, gracias por ayudarme a salir adelante en todo, usted fue parte esencial de este logro en mi vida y quiero que sepa que más que mi asesora siempre fue y seguirá siendo un gran ejemplo que quiero seguir, gracias por todas las oportunidades, consejos y más que nada por la confianza que siempre demostró hacia mi persona.

Doctor Denis Cantú Lozano

Doctor Denis, gracias por todas sus enseñanzas y por esa amabilidad con la cual siempre conté, muchas gracias también por todas las aportaciones que hizo usted hacia mi trabajo y mi persona es usted un gran maestro, un gran líder y realmente fue un honor ser su alumna.

Doctora Rosalía Cerecero Enríquez

Doctora le agradezco ser parte de este trayecto, fue muy grato conocerla y tener esa libertad de expresión con usted, gracias por todas las risas y por los momentos agradables que siempre nos dio en cada clase y cada plática con usted.

Doctor Galo Rafael Urrea García

Doctor, a usted le agradezco la amabilidad y respeto que siempre me demostró, por todas sus enseñanzas y también por ser parte esencial para poder culminar este proyecto, es un gran ejemplo a seguir de disciplina y constancia.

Conacyt

Al consejo nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Química con número de registro 663029.

DEDICATORIAS

A Dios

A ti señor lo mas importante en mi vida, te agradezco padre por permitirme llegar hasta aquí, porque a pesar de los obstáculos que se me presentaron siempre pude salir adelante gracias a tu gran amor y bondad sin ti no habría logrado esto.

A mi familia

Papá y mamá: gracias por su apoyo porque sin pedir algo a cambio estuvieron ahí siempre para mí, porque me han demostrado su cariño, amor y me impulsaron a seguir adelante, gracias por todos los sacrificios que día a día hicieron para poder terminar este gran proyecto, los amo con el alma ustedes son y serán siempre mi motivación en todo, a mi hermana vale y cuñado gracias por su cariño pero sobre todo gracias por darme ese gran regalo de ser tía, a mi hermoso sobrino por darle tanta alegría a mi vida, a mi hermanita Fer, a ti te agradezco por soportarme en mis mejores y peores momentos eres pieza clave para mí y mi motivación para ser un excelente ejemplo para tu vida te quiero mucho, a mi abuela Elena gracias porque siempre he recibido de ti mucho apoyo en todos los aspectos, gracias por tu amor conmigo y por ser la abuela que todos quisieran tener, te quiero.

A Martin

¿Qué te puedo decir que no sepas? Gracias por tu apoyo incondicional, por ser mi compañero de lagrimas y risas, agradezco cada minuto de tiempo a tu lado y tu comprensión, tu eres parte muy importante de mi vida y con quien quiero seguir celebrando metas cumplidas, gracias por esas palabras de aliento en días de desesperación y por todos los días de felicidad y recuerda siempre que a veces solo necesitamos que todas las cosas que hagamos sean hechas con amor IC 16:14 para poder lograrlas, te amo con todo mi corazón.

Amigos de laboratorio

Cint gracias por ser mi guía y demostrarme siempre tu amistad eres una gran persona y vas para mucho porque tienes esa inteligencia y humildad que muchos quisieran tener te quiero mucho y te estoy muy agradecida por todo, don Alfred gracias por todos los días de trabajo donde pusiste un granito de arena para que no me amargara (porque ya me estaba amargando) eres una gran persona y llegaras muy lejos con esa alegría y dedicación que te caracterizan, Rosy gracias por todo tu apoyo en este trayecto y por enseñarme que los buenos amigos siempre están ahí en las buenas y malas eres una excelente amiga te quiero mucho, Ale amiga te agradezco tu cariño y ayuda en todo momento, gracias por hacer mis días de trabajo menos pesados eres genial y una brillante chica quiero mucho, finalmente gracias por su amabilidad y compañerismo a todos los miembros del laboratorio de bioprocesos van muy bien sigan así de aplicados y llegaran muy lejos.

Ustedes mi gran equipo de laboratorio me enseñaron que para tener grandes amigos no se necesitan muchos años, los quiero muchísimo y agradezco a Dios la oportunidad que me dio de conocerlos son unas maravillosas personas y siempre ocuparan un lugar especial en mi corazón.

A mis compañeros de generación

Les agradezco el tiempo compartido y todas las experiencias vividas, gracias a ustedes aprendí muchas cosas, tuvimos muy buenas y muy malas experiencias pero de todo se aprende en esta vida, a todos ustedes les deseo siempre éxito en su vida.

A mis amigos

Mis grandes amigos de muchos años Pamela, Laura, Aldrich y Lui, a ustedes también les dedico este trabajo porque siempre han estado pendiente de mí a pesar de la distancia, gracias por todo su cariño y comprensión en todo momento, Aldrich a ti te agradezco de manera especial todo tu apoyo para lograr este objetivo eres un gran chico y excelente persona, gracias por tu amistad porque a pesar de todo siempre estuviste conmigo, amigas Yare y Narda gracias también por todo lo vivido por su cariño y consejos, a todos ustedes los quiero muchísimo.

Esta tesis se desarrolló en el Instituto Tecnológico de Orizaba en el periodo de Enero de 2015-Diciembre 2016. Las presentaciones en congresos y publicaciones que se obtuvieron al final del desarrollo de esta tesis se enlistan a continuación.

PRESENTACIONES EN CONGRESOS

- | | | |
|------|----------|--|
| 2016 | Póster | Efecto de las variables del proceso de liofilización sobre el chayote (<i>Sechium edule</i>). Presentación en el I Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería Delegación Oaxaca. Tuxtepec, Oaxaca, México. 7-8 Julio 2016. |
| 2016 | Ponencia | Proceso de liofilización de chayote (<i>Sechium edule</i>). Presentación en el coloquio de Investigación Multidisciplinario (CIM) 2016. Orizaba, Veracruz, México. 20-21 Octubre 2016. |

PUBLICACIONES

- | | | |
|------|--|--|
| 2016 | | J. Chávez-Gutiérrez, C. Muñoz-López, D. Cantú-Lozano, G. Luna-Solano. EFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN SOBRE EL CHAYOTE (<i>Sechium edule</i>). Memorias del I Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería Delegación Oaxaca, Julio 2016. Tuxtepec, Oaxaca, México. |
| 2016 | | J. Chávez-Gutiérrez, C. Muñoz-López, D. Cantu-Lozano, R. Pérez-Ávila, G. Luna-Solano. Proceso de liofilización de chayote (<i>Sechium edule</i>). Revista de Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, Vol.4, Núm. 1 2016. Orizaba, Veracruz, México. |

RESUMEN

Proceso de ultracongelación y liofilización de chayote (*Sechium edule*)

Realizado por: I.Q. Josefina Chávez Gutiérrez

Dirigido por: Dra. Guadalupe Luna Solano

Dr. Denis Cantú Lozano

El chayote (*Sechium edule*) es un fruto de exportación no tradicional que representa un importante elemento en la dieta de las personas que viven en muchas partes del mundo. El 90% de su peso está constituido por agua lo que lo hace un fruto altamente perecedero y por lo tanto presenta difícil comercialización. Hoy en día, la liofilización no sólo actúa como una herramienta tecnológica en el proceso de secado, sino que también proporciona un producto alimenticio de más alta calidad que el obtenido por cualquier método de secado. La liofilización puede ser una alternativa adecuada para el procesamiento de chayote. Por esta razón, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del proceso de liofilización sobre las características fisicoquímicas del chayote. Se aplicó un diseño experimental 3x3x2, en el diseño dos variables cuantitativas: presión de vacío (0.05 y 0.1 mbar) y temperatura de ultracongelación (-40, -60 y -80 °C) y una variable cualitativa: forma geométrica (rodajas, cubos y tiras) fueron analizadas. Como complemento, el comportamiento de rehidratación fue estudiado (agua a 20, 40, 60 y 80 °C). Los resultados mostraron claramente que la actividad de agua (a_w) y humedad (X) disminuyeron en las tiras y cubos entre las primeras 9 y 12 h de 0.988 a 0.55 y de 90.380 a 8% respectivamente, para las rodajas fue después de las 12 h cuando se obtuvieron valores similares; en términos de calidad, los resultados obtenidos de color fueron aceptables dentro del rango de color de frutos deshidratados, sin embargo la diferencia de color más alta se observó en el chayote en forma de cubos a -40 °C y ambas presiones. De acuerdo al análisis estadístico con prueba de Tukey ($p=0.05$) al final del proceso de liofilización (24 h) las variables independientes no mostraron efecto significativo en sobre la X y a_w del chayote liofilizado. Finalmente, durante la rehidratación las muestras secas recobraron su forma por hinchamiento y se observó que no hubo diferencia significativa en las cinéticas de rehidratación.

ABSTRACT

Deep-freezing process and lyophilization of vegetal pear (*Sechium edule*)

By: I.Q. Josefina Chávez Gutiérrez

Advisors: Dra. Guadalupe Luna Solano

Dr. Denis Cantú Lozano

The vegetal pear (*Sechium edule*) is a non-traditional export fruit that represents an important element in people's diet worldwide. 90% of its weight consists of water making it highly perishable fruit and therefore have a difficult commercialization. Nowadays, freeze drying not only acts as a technological tool in drying process, but also produces the highest quality food product obtainable by any drying method. Lyophilization may be a suitable alternative for the processing of vegetal pears. For this reason, the objective of this study was to evaluate the effect of freeze-drying process on physicochemical characteristics of vegetal pear. A 3x3x2 experimental design was applied. In this design two quantitative variables were analyzed vacuum pressure (0.05 and 0.1 mbar) and deep freezing temperature (-40, -60 and -80 °C) and as a qualitative variable, geometric shape (slices, cubes and strips). In addition, rehydration behavior was studied (water at 20, 40, 60 and 80°C). The results clearly demonstrates that a_w and content X decreased in strips and cubes between the firsts 9 and 12 h from 0.988 to 0.55 and from 90.380 to 8% respectively, for slices was after that 12 h when gotten similar values; in terms of quality, the color results obtained were in the accepted ranged of freeze dried fruits, however the highest color difference was observed for vegetable pear cubes frozen at -40 °C and dried at both pressures. According to statistical analysis with Tukey test ($p=0.05$) at the end of the freeze drying process (24 h) the independent variables did not show significant effect on X and a_w of freeze dried. Finally, during rehydration the dried samples recovered their size by swelling and was observed that there is not difference in the rehydration kinetics.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	vii
NOMENCLATURA	viii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
JUSTIFICACIÓN	3
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
1.1 Generalidades del chayote	5
1.1.1 Valor nutricional	6
1.1.2 Diversidad genética y usos	7
1.1.3 Producción mundial y nacional de chayote	11
1.1.4 Exportación de chayote	12
1.2 Proceso de ultracongelación	14
1.2.1 Ventajas de la ultracongelación	16
1.3 Liofilización	17
1.3.1 Etapa de congelación	18
1.3.2 Etapas de secado por sublimación	18
1.4 Propiedades fisicoquímicas en los alimentos	19
1.4.1 Actividad de agua	20

1.4.2 Humedad	22
1.4.3 Color	23
1.4.4 Grado de rehidratación	25
1.5 Aplicación de diseños de experimentos en el proceso de secado	26
1.5.1 Diseño de experimentos de tres factores	26
1.6 Estudios realizados sobre chayote (<i>Sechium edule</i>)	27
1.7 Estudios realizados sobre liofilización	28
CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1 Metodología general	32
2.2 Selección y caracterización de la materia prima	33
2.3 Acondicionamiento del chayote	33
2.4 Proceso de ultracongelación	34
2.5 Proceso de liofilización	35
2.5.1 Diseño de experimentos	36
2.6 Caracterización fisicoquímica del chayote	37
2.6.1 Actividad de agua	38
2.6.2 Contenido de humedad	38
2.6.3 Análisis de color	38
2.6.4 Determinación de proteínas	39
2.6.5 Determinación de cenizas	40
2.6.6 Grado de rehidratación	41
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
3.1 Caracterización fisicoquímica del chayote	43

3.2 Liofilización de chayote	44
3.2.1 Resultados de actividad de agua del chayote liofilizado	44
3.2.1.1 Cinéticas de evolución de actividad de agua	44
3.2.1.2 Actividad de agua del chayote al final del proceso de liofilización	47
3.2.2 Humedad del chayote durante el proceso de liofilización	49
3.2.2.1 Cinéticas de evolución de humedad	49
3.2.2.2 Humedad del chayote al final del proceso de liofilización	52
3.2.3 Color del chayote durante el proceso de liofilización	54
3.2.3.1 Cinéticas de evolución del parámetro de color L*	54
3.2.3.2 Cinéticas de evolución del parámetro de color a*	58
3.2.3.3 Cinéticas de evolución del parámetro de color b*	60
3.2.3.4 Cinéticas de evolución del parámetro de color ΔE	63
3.2.3.5 Color del chayote al final del proceso de liofilización	66
3.2.4 Rehidratación del chayote (<i>Sechium edule</i>)	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	75
Apéndices	88

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pág.
1.1	Diversidad morfológica del fruto de <i>Sechium edule</i> (Reyes Hernández, 2012)	8
1.2	Variedades de <i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sw. (A) <i>nigrum xalapensis</i> , (B) <i>amarus sylvestris</i> , (C1) <i>albus levis</i> , (C2) <i>albus dulcis</i> , (C3) <i>albus minor</i> , (D) <i>nigrum máxima</i> , (E) <i>nigrum minor</i> , (F) <i>nigrum levis</i> , (G) <i>virens levis</i> , (H) <i>nigrum spinosum</i> , (I) <i>albus spinosum</i> , (J) <i>nigrum conus</i> (Avendaño <i>et al.</i> , 2010)	8
1.3	Chayote con calidad de exportación (Fundación produce, 2011)	13
1.4	Representación gráfica del proceso de congelación bajo tres niveles de intensidad (I, II, III) para determinar la capacidad de enfriamiento (Bello-Gutiérrez, 2000)	16
1.5	Sistema básico de liofilización (Barbosa-Cánovas y Vega Mercado, 1996)	17
1.6	Estabilidad microbiológica y térmica del alimento, crecimiento microbiológico, reacciones químicas y bioquímicas en función de la a_w (Badui, 2006)	22
1.7	Espacio de color Hunter L*, a*, b* (Konica, Minolta)	24
2.1	Diagrama general del proceso de ultracongelación y liofilización en chayote	32
2.2	Muestras de chayote (<i>Sechium edule</i>)	33
2.3	Acondicionamiento de las muestras: a) rodajas, b) cubos y c) tiras.	33
2.4	Muestras de chayote sometidas a ultracongelación	34

2.5	Ultracongelador Vertical SO-LOW utilizado en el proceso de ultracongelación	34
2.6	Liofilizador LABCONCO Modelo 742004	35
3.1	Evolución de la a_w del chayote durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	45
3.2	Evolución de la a_w del chayote durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	46
3.3	Evolución de la humedad del chayote durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	50
3.4	Evolución de la humedad del chayote durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	51
3.5	Evolución del color del chayote (parámetro L*) durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	56
3.6	Evolución del color del chayote (parámetro L*) durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	57
3.7	Evolución del color del chayote (parámetro a*) durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	58
3.8	Evolución del color del chayote (parámetro a*) durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	59
3.9	Evolución del color del chayote (parámetro b*) durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	61
3.10	Evolución del color del chayote (parámetro b*) durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	62
3.11	Evolución del parámetro ΔE durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	64

3.12	Evolución del parámetro ΔE durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C	65
3.13	Muestras de chayote al final del proceso de liofilización en sus tres formas a) Rodajas, b) cubos y c) tiras	68
3.14	Muestras de chayote rehidratadas con agua a diferentes temperaturas: a) 20 °C, b) 40 °C, c) 60 °C y d) 80 °C	70
3.15	Muestras de chayote a) liofilizadas y b) rehidratadas.	71

LISTA DE TABLAS

Tablas		Pág.
1. 1	Clasificación de chayote (Lira, 1996)	6
1.2	Composición química del chayote (% o mg/100 g) de fruto, tallo y raíces (Engels, 1983)	7
1.3	Datos estadísticos de la producción de chayote en México (SINAREFI, 2015)	11
1.4	Producción de chayote por entidad productora en México	12
1.5	Producción de chayote en el estado de Veracruz	12
2.1	Factores y niveles del diseño de experimentos en el proceso de liofilización de chayote (<i>Sechium edule</i>)	36
2.2	Diseño con niveles mixtos 3x3x2 aplicado al proceso de liofilización	37
3.1	Caracterización fisicoquímica del chayote (<i>Sechium edule</i>)	43
3.2	Actividad de agua del chayote al final del proceso de liofilización	48
3.3	Humedad del chayote al final del proceso de liofilización	53
3.4	Color del chayote al final del proceso de liofilización	67

NOMENCLATURA

Símbolo		unidades
a_w	Actividad de agua	[-]
P	Presión parcial del vapor de agua	(atm/m ³)
p_0	Presión parcial del vapor de agua pura	(atm/m ³)
HR	Humedad relativa	
a^*	Parámetro de color a	[-]
b^*	Parámetro de color b	[-]
L^*	Parámetro de color L	[-]
X	Contenido de Humedad	g
m_x	Contenido de Humedad de la muestra húmeda	%
m_s	Contenido de Humedad de la muestra seca	%
ΔE	Diferencia de color	[-]
ΔL	Diferencia de color del parámetro L	[-]
$L_{inicial}, L_{final}$	Parámetro de color L inicial y final	[-]
Δa	Diferencia de color del parámetro a	[-]
$a_{inicial}, a_{final}$	Parámetro de color a inicial y final	[-]
Δb	Diferencia de color del parámetro b	[-]
$b_{inicial}, b_{final}$	Parámetro de color b inicial y final	[-]
A	Factor A en el diseño de experimentos	
B	Factor B en el diseño de experimentos	
C	Factor C en el diseño de experimentos	
% Proteínas	Porcentaje de proteínas	%
% Cenizas	Porcentaje de cenizas	%
Factor	Factor para proteínas en alimentos, 6.25	
m	Masa de la muestra	(g)
N	Normalidad de HCL	
V	Volumen gastado de HCL	(mL)

T_{uc}	Temperatura de ultracongelación	°C
F_m	Forma de la muestra	
P_{lio}	Presión del liofilizador	mbar
Φ	Diámetro externo del chayote	cm
δ	espesor	cm
L	largo	cm
a	Área	cm ²
X_f	Humedad final	%
g s.s	Gramos de sólido seco	g
tira	(paralelepípedo) Figura geométrica de seis caras, paralelas dos a dos; dos de las caras paralelas entre si se denominan bases y la distancia entre ellas altura.	
rodaja	Trozo circular, generalmente delgado y de grosor uniforme, que se corta de un alimento sólido de forma redonda o cilíndrica.	

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el Estado de Veracruz está catalogado como el mayor productor de chayote (*Sechium edule*) en México, este producto se encuentra altamente arraigado a la cocina mexicana y del mundo al combinarse en guisados, ensaladas y en dietas relacionadas con la reducción de peso, debido a que es un alimento completo por su contenido de carbohidratos, proteínas, calcio, fósforo, hierro, vitamina A, tiamina, riboflavina, niacina, ácido ascórbico, azúcar soluble y agua; también es utilizado en la industria alimenticia para la elaboración de alimentos infantiles, jugos, salsas y pastas, además se le atribuyen propiedades medicinales (Ordoñez *et al.*, 2006; Gordon *et al.*, 2000; Lars y Lai, 1986; Alvarenga-Venutolo *et al.*, 2007).

Este producto alimenticio ha mantenido un crecimiento sostenido en las últimas décadas gracias a su consumo nacional, al ser un producto de calidad internacional y al tener características nutritivas lo hacen ser uno de los más consumidos dentro de las hortalizas.

El chayote (*Sechium edule*), por sus múltiples aplicaciones alimentarias, puede ser procesado para extender su tiempo de vida útil mediante los métodos de ultracongelación y liofilización, y así de esta forma mantener las propiedades funcionales deseables. En el proceso de liofilización, el material a secarse primero es congelado y posteriormente el vapor de agua es eliminado mediante sublimación. Durante la liofilización la temperatura debe de mantenerse lo suficientemente baja para evitar que se derritan los cristales de hielo presentes, por lo que la aplicación de calor de sublimación debe ser controlada; además, como la presión de vapor del hielo empleada es considerablemente menor que la presión atmosférica, la liofilización requiere un alto vacío en la cámara de secado (Orrego, 2008).

Por todo lo anterior, la congelación y la liofilización son alternativas que permiten comercializar productos que generalmente no pueden ser exportados fácilmente en forma fresca como el chayote y que después de un almacenamiento prolongado, al ser rehidratados, conservan el color, sabor, aroma y apariencia original (Orrego, 2008; Barreto, 1996).

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del proceso de ultracongelación y liofilización sobre las características fisicoquímicas de chayote (*Sechium edule*).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente el chayote utilizado para su procesamiento.
- Establecer las condiciones del procesamiento por ultracongelación y liofilización en el chayote.
- Evaluar estadísticamente el efecto de la temperatura de ultracongelación sobre las características fisicoquímicas del chayote liofilizado.
- Obtener las curvas de liofilización y rehidratación del chayote.

JUSTIFICACIÓN

El chayote es un fruto importante para consumo humano por sus múltiples propiedades curativas y dietéticas. En México, según SAGARPA (2015), Veracruz es el Estado de mayor producción de chayote (*Sechium edule*) con una superficie aproximada de 2,500 hectáreas anuales que aportan 87% del volumen total nacional; sin embargo, la exportación de este producto se ha visto limitada por el poco interés de los inversionistas y agricultores debido al bajo precio que reciben por el producto en fresco.

Este fruto al ser exportado a otros países debe pasar por múltiples especificaciones de calidad y largos periodos de transporte (± 15 días) que ocasionan un producto de menor calidad debido a cambios en color, textura diferente al producto fresco y un tiempo de vida relativamente corto para el consumo humano, por lo anterior los agricultores reciben un pago monetario mínimo por la venta de su producto debido a que las pérdidas por exportación son altas.

El secado por liofilización representa una alternativa ante este problema, este proceso tiene múltiples ventajas como son la obtención de un producto con una vida útil prolongada, alta retención de nutrientes (97%), color, olor y sabor similares a los del producto fresco o en algunas ocasiones los dos últimos intensificados, rehidratación completa y rápida, mínima reducción de volumen y una humedad del producto liofilizado $<2\%$, logrando con todas estas ventajas de la liofilización un producto deshidratado de chayote estable adecuado para la exportación, favoreciendo económicamente a los agricultores con un proceso donde las pérdidas por descomposición no tendrán lugar porque el tiempo de vida útil del producto liofilizado incrementa de uno a tres años (Parzanese, 2015).

CAPITULO 1
FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Generalidades del chayote

El chayote *Sechium edule* (Jacq.) Sw., (*Cucurbitaceae*), es originario de Mesoamérica, donde se encuentra la mayor diversidad genética, pero se cultiva de manera rústica en muchas partes del mundo, siendo uno de los frutos más accesibles para los grupos de bajos ingresos (Alvarenga-Venutolo *et al.*, 2007).

La planta en la que crecen son guías que rebasan los seis metros de largo; sus hojas son acorazonadas, anguladas y ásperas, miden entre 10 y 15 cm el fruto es una baya solitaria o en pares sobre un mismo pedúnculo, periforme o redondeado, de apariencia tosca, carnoso, jugoso y sabor suave, generalmente de color verde en diferentes tonos, dependiendo de la variedad pesa de 200 g a 2 kg (Alvarenga-Venutolo *et al.*, 2007); el chayote posee un bajo contenido de lípidos, proteínas y calorías, pero es una fuente importante de minerales, aminoácidos y vitaminas (Ordóñez *et al.*, 2006) además, alrededor del 95% en peso fresco de la fruta es agua (Cadena-Iñiguez y Arévalo-Galarza, 2010). Aunque su principal uso es alimentario para la elaboración de alimentos infantiles, jugos, salsas y pastas, también es utilizado con fines artesanales y medicinales principalmente (Lira, 1996). Una forma viable para extender la vida útil de chayote es reduciendo su contenido de humedad.

La especie *Sechium edule* pertenece a la familia de las *Cucurbitáceas*, uno de los grupos de plantas con mayor número de especies con importancia económica y cultural. En México se han reportado 141 especies pertenecientes a 38 géneros de las subfamilias *Cucurbitoideae* y *Zanonioidae* (Lira, 2001). De las cuales en Veracruz se encuentran 23 géneros y 825 especies (Nee, 1993). La especie *Sechium edule* fue descubierta y descrita por Browne en 1976 en Jamaica y posteriormente en 1763 fue clasificado simultáneamente como *Sycos edulis* por Jacquin y como *Choco*

edulis por Adanson. En 1788, Jacquin, cambió su nombre a *C. edulis* y lo colocó en el género Chayota. Pocos años después, Swartz, en 1800, fue el primero en incluir esta especie en *Sechium*, cuando propuso el nombre por el que el chayote es conocido actualmente, *S. edule* (Jacq.) Swartz (Lira, 1996) (citado por Reyes Hernández, 2012). De acuerdo a Lira (1996), la clasificación taxonómica del chayote es la de la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1 Clasificación de chayote (Lira, 1996).

Reino	<i>Plantae</i>
Subdivisión	<i>Angiospermae</i>
Subclase	<i>Metachlamideae</i>
Orden	<i>Cucurbitales</i>
Familia	<i>Cucurbitaceae</i>
Género	<i>Sechium</i>
Especie	<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Swartz

La especie *Sechium edule* es una planta trepadora, perenne, monoica y vivípara de tallos aristados, muy ramificados (Gamboa, 2005). Los tallos tienen cordones de fibras largas y fuertes, los bejucos crecen de una cepa permanente y duran de uno a dos años. De un nudo del tallo brota un zarcillo, de base larga y fuerte, que termina en tres o cuatro ramillas, una de ellas más gruesa y larga que las otras. Del lado opuesto del nudo brota una hoja, de cuya axila salen inflorescencias o ramas vegetativas. Las hojas tienen el pecíolo corto y generalmente curvo. Hay cinco nervios principales que salen del pecíolo, hundidos en el lado superior y prominentes en el reverso de la lámina (León, 2000).

1.1.1 Valor nutricional

El chayote es un alimento completo debido a que posee carbohidratos, vitamina A, ácido ascórbico y otros elementos esenciales para el cuerpo humano, los componentes químicos del chayote *Sechium edule* se enlistan en la Tabla 1.2.

El chayote cuenta con un alto contenido de agua, lo que lo convierte en un fruto altamente perecedero. Su composición depende principalmente de la variedad de chayote, la zona ecológica, el manejo del cultivo y el estado de crecimiento de la planta. El fruto y la semilla contienen aminoácidos, entre los cuales se encuentran: lisina, histina, argininas, ácido aspártico, ácido glutamínico, cisteína, valina, isoleucina, serina, alanina y tirosina.

Tabla 1.2 Composición química del chayote (% o mg/100 g) de fruto, tallo y raíces (Engels, 1983).

Componente	Fruto	Semilla	Tallo	Raíz
Calorías	26-31	---	60	79
Humedad (%)	89-93	---	89.7	79.7
Azúcar soluble (%)	3.3	4.2	0.3	0.6
Proteínas (%)	0.9-1.1	5.5	4	2
Grasas (%)	0.1-0.3	---	0.4	0.2
Carbohidratos (%)	3.5-7.7	60	4.7	17.8
Fibras (%)	0.4-1	---	1.2	0.4
Cenizas (%)	0.4-0.6	---	1.2	1
Ca (mg)	12-19	---	58	7
P (mg)	4-30	---	108	34
Fe (mg)	0.2-0.6	---	2.5	0.8
Vitamina A (mg)	5	---	615	---
Tiamina (mg)	0.03	---	0.08	0.05
Riboflavina (mg)	0.04	---	0.18	0.03
Niacina (mg)	0.4-0.5	---	1.1	0.9
Ácido ascórbico (mg)	11-20	---	16	19

1.1.2 Diversidad genética y usos

En Centroamérica se conocen más de 25 variedades de chayote que se diferencian por el tamaño, forma, color, espinas y cantidad de fibra en el endocarpo del fruto.

La coloración del fruto varía desde crema hasta verde oscuro y su forma es aperada, redonda, ovoide, alargada y puede presentar espinas o ser completamente liso (Figura 1.1) (Olguín-Hernández *et al.*, 2013).



Figura 1.1 Diversidad morfológica del fruto de *Sechium edule* (Reyes-Hernández, 2012).

Cadena-Iñiguez *et al.* (2008), estudiaron la variación morfológica y anatómica de frutos y hojas de chayote en el Estado de Veracruz, encontraron que las clasificaciones fenotípicas de acuerdo con las características típicas del chayote están relacionadas con cambios anatómicos y morfológicos dirigidos a mejorar la especialización adaptativa de los diferentes tipos de chayote y en co-evolución con el hombre se han desarrollado los chayotes verdes y amarillos. Con base en estos trabajos, el GISeM (Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México, A.C.) reconoce 10 variedades de chayote que se muestran en la Figura 1.2.

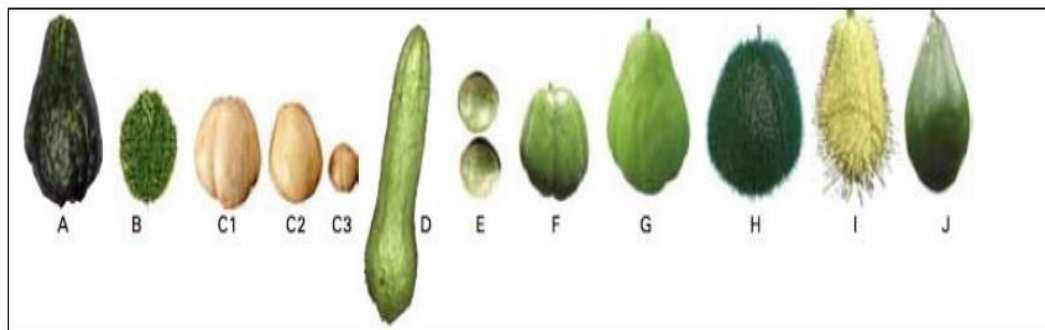


Figura 1. 2 Variedades de *Sechium edule* (Jacq.) Sw. (A) *nigrum xalapensis*, (B) *amarus sylvestris*, (C1) *albus levis*, (C2) *albus dulcis*, (C3) *albus minor*, (D) *nigrum máxima*, (E) *nigrum minor*, (F) *nigrum levis*, (G) *virens levis*, (H) *nigrum spinosum*, (I) *albus spinosum*, (J) *nigrum conus* (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2010).

La variedad *virens levis* presenta mayor velocidad de crecimiento, esta variedad es la más conocida por su impacto comercial y respecto a su índice de cosecha se conoce que su madurez hortícola oscila entre los dieciocho y veintiún días (Reyes-Hernández, 2012).

Los frutos de chayote, tallos y hojas tiernas, así como las raíces, son consumidos como verdura. En México, se ha intentado aumentar la vida útil del fruto mediante deshidratación, los resultados han sido buenos y han hecho posible elaborar mermeladas, dulces y fruto deshidratado que puede utilizarse después de cierto tiempo. Es un ingrediente común en la gastronomía mexicana, actualmente su consumo tiene gran demanda debido a sus amplias propiedades nutricionales, que lo hacen ser una de las hortalizas que se incluyen en la mayor parte de dietas, por su bajo contenido de almidón, alto contenido de agua, bajo contenido calórico y presencia de potasio. Es un alimento alto en fibra, bajo en calorías y no tiene colesterol (Gamboa, 2005).

El fruto es la parte de la planta que más se consume, su alto contenido de agua la convierte en un fruto poco nutritivo, pero muy dietético, además es una fuente de minerales y vitaminas. En el fruto, los macronutrientes y micronutrientes disminuyen conforme éste crece. No obstante, cerca de la germinación estos nutrientes y el almidón aumentan. La sacarosa es alta en los primeros estadios del crecimiento del fruto y disminuye con el aumento de su tamaño. En cambio la raíz tuberosa tiene un gran valor alimenticio por su alto contenido de carbohidratos (Gamboa, 2005).

Para el consumo humano, las hojas son preparadas en diversos platillos, ya sea en ensalada o al vapor, el tallo y los zarcillos son cocinados como plato caliente o sopa, el fruto ha sido cocinado desde tiempos ancestrales en una gran diversidad de platillos, por diferentes culturas prehispánicas hasta nuestros días, el fruto tierno se utiliza como verdura o en rebanadas para ensalada, y en estado sazón, se usa cocido entero en la sopa, en picadillo, en la elaboración de pasteles y envuelto en

huevo. La semilla tiene sabor a nuez, si se tuesta o cocina tiene un gusto excelente (Gamboa, 2005). También, se han documentado ampliamente en la literatura algunos usos medicinales de *Sechium edule* entre los que destacan las infusiones de hojas para disolver cálculos renales y como auxiliar en el tratamiento de la arteriosclerosis e hipertensión y las infusiones de frutos para aliviar la retención de la orina y los ardores al orinar. La información etnobotánica, etnohistórica y farmacológica existente sobre el chayote sugiere que su efectividad en la curación de enfermedades renales debe ser alta. Además de que las propiedades diuréticas de sus hojas y semillas han sido comprobadas por estudios modernos (Lira, 1996).

Otras propiedades medicinales del chayote que también han sido corroboradas por estudios farmacológicos, son las que conciernen a enfermedades cardiovasculares, inflamaciones intestinales, cutáneas, cauterización de las heridas y las inflamatorias. Lira (1998); Monroy-Vázquez *et al.* (2009) y Olguín-Hernández *et al.* (2013) reportaron que un extracto alcohólico de frutos de *Sechium edule* variedad *Nigrumspinosum* presenta la posibilidad de detener la proliferación de células cancerígenas.

Además de su uso alimenticio y medicinal, la utilidad del chayote abarca otros aspectos en distintas regiones del mundo. Por ejemplo, la pulpa de sus frutos, por su suavidad, se emplea para dar consistencia a varios alimentos infantiles, jugos, salsas y pastas; mientras que los tallos, por su flexibilidad y resistencia, y su color blanco plateado, han sido destinados a la fabricación artesanal de cestería, cuerdas y sombreros en algunas regiones como las Islas Reunión (Gamboa, 2005).

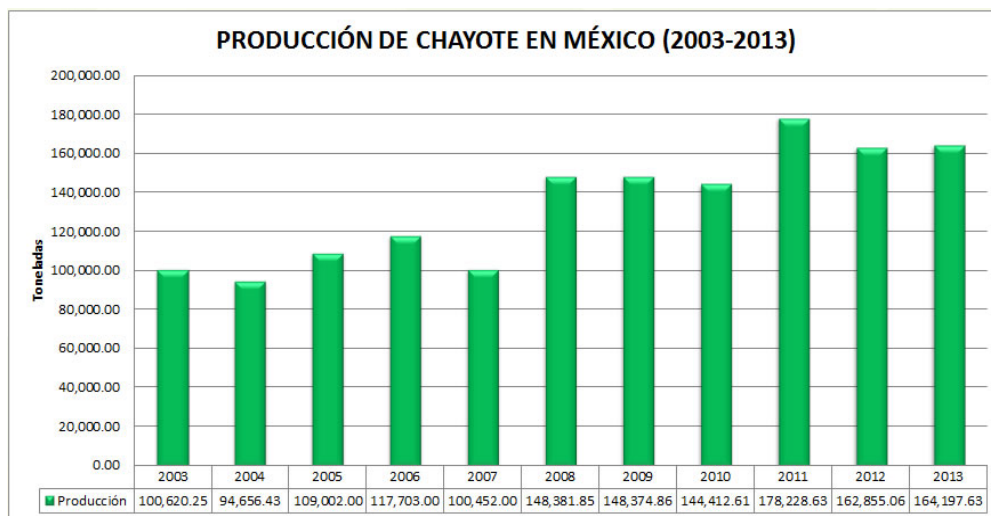
A pesar de que el chayote puede ser utilizado en forma integral y múltiple, en varios países la mayoría de estos usos no se han difundido, o no se han ideado las formas de hacerlos accesibles a otros sectores de la población fuera del campesino (COVECA, 2010).

1.1.3 Producción mundial y nacional de chayote

Los principales países productores de chayote además de México, son Costa Rica, Guatemala, Brasil, Estados Unidos de América, Argelia, India, Nueva Zelanda y Australia; En México los estados que generan una producción importante para el mercado son: Chiapas, Michoacán, Estado de México, Nayarit, Jalisco y Veracruz, este último es el principal productor nacional con una superficie aproximada de 2,500 ha anuales que aportan el 87% del volumen total y reporta producción durante todo el año (SIAP, 2015).

Costa Rica es el principal exportador de Chayote del mundo. La producción de chayotes de exportación data de 1969, a pesar de ello, es hasta 1972 que se logra la primera exportación de ese país. Durante los últimos cinco años Costa Rica ha surtido al menos el 82% de las importaciones de chayote de Estados Unidos, los otros proveedores son México y el resto de los países de Centroamérica. Olguín-Hernández *et al.* (2013) reportan a México como el principal productor de chayote en el mundo, pero solo exporta la quinta parte de esta producción. En la Tabla 1.3 se observan los valores de producción de chayote en México en un periodo de 10 años.

Tabla 1. 3 Datos estadísticos de la producción de chayote en México (SINAREFI, 2015).



En la Tabla 1.4 se muestra la producción de chayote en México destacando el estado de Veracruz como el estado líder en producción de chayote a nivel nacional y en el estado de Veracruz, los municipios de Actopan e Ixtaczoquitlan ocupan el primero y segundo lugar de producción respectivamente (Tabla 1.5) (COVECA, 2010).

Tabla 1.4 Producción de chayote por entidad productora en México
(www.siacon.sagarpa.gob.mx).

ESTADOS	2004	2005	2006	2007	2008
Veracruz	69,438	82,019	88,977	74,062	112,361
Michoacán	15,854.63	17,600	18,720	16,768	18,439.95
Jalisco	5,089	6,425	5,782	6,656	14,540
S.L.P.	2,000	1,500	2,400	1,700	1,500
México	750	1,000	1,000	665	977.5
TOTAL	94,656.43	109,002	117,703	100,452	148,381.85

Tabla 1.5 Producción de chayote en el estado de Veracruz
(www.oedrus.gob.mx).

MUNICIPIOS	2004	2005	2006	2007	2008
Actopan	21,760	19,924	22,896	19,380	40,460
Ixtaczoquitlán	9,060	23,985	25,404	17,160	28,645
Coscomatepec	21,000	21,000	24,000	24,000	23,700
Ixhuatlan del café	3,010	5,600	5,600	5,950	6,035
Chocaman	4,500	3,150	3,375	2,255	4,125
TOTAL	69,438	82,019	88,977	74,062	112,361

A pesar de que Veracruz es la entidad que ocupa el primer lugar en superficie sembrada y cosechada de chayote, otros estados como Michoacán le van a la zaga con diferencias en volúmenes, atendiendo nichos de mercado específicos como el de exportación (SIAP, 2015).

1.1.4 Exportación de chayote

México es el primer productor a nivel mundial de chayote; sin embargo, Costa Rica es el primer exportador de este producto hacia los Estados Unidos y otros países; esto debido a que existen ciertos factores que limitan la exportación nacional como lo son la refrigeración, manipulación y variabilidad en características (SIAP, 2015).

En el estado de Veracruz, los productores se enfrentan a diversas problemáticas de almacenamiento y refrigeración del producto de exportación, causando daños físicos que generan obscurecimiento en el pericarpio, formación de depresiones, maduración incompleta, incrementa la susceptibilidad al ataque microbiano, formación de brotes y pérdida de peso (Parking *et al.*, 1989).

En la Figura 1.3 se presenta el fruto de chayote con características de exportación, los cuales deben ser tiernos, con un peso promedio entre 350-450 g, con una longitud promedio de 8 a 9 cm de diámetro.



Figura 1.3 Chayote con calidad de exportación (Fundación produce, 2011).

Los principales factores que limitan la exportación del chayote ocurren durante su manipulación por daño de origen mecánico por compresión en el producto, y también durante su refrigeración (Morton, 1981).

Otros factores son:

- Enfermedades
- Daños de origen mecánico (heridas y compresiones)
- Insectos
- Espinas
- Deformidades, espinas, estrías largas y profundas
- Frutos muy grandes o pequeños

Si el chayote presenta alguno de los defectos anteriores no cumple con la calidad de exportación requerida; Por todas estas especificaciones de calidad, México tiene grandes pérdidas económicas en la exportación de chayote, esto pese a ser el principal productor a nivel mundial.

1.2 Proceso de ultracongelación

La congelación es un método de conservación de alimentos que se basa en condiciones de temperaturas inferiores al punto de congelación del agua contenida en el alimento, tiene como objetivo transformar en cristales de hielo el máximo del contenido acuoso, con lo que se prolonga el periodo de vida útil del alimento al reducir el valor de su actividad de agua (a_w); con ello, se consigue que las moléculas de agua no queden disponibles para formar parte de reacciones químicas, ni para ser utilizadas en el metabolismo microbiano, se sabe que pocos microorganismos pueden crecer por debajo de los 0° C (microorganismos psicrófilos). Además, durante el proceso de la congelación, el agua del alimento deja de estar en solución y se transforma en cristales de hielo; en consecuencia, aparecen algunos cambios en las propiedades fisicoquímicas del mismo (Bello-Gutiérrez, 2000).

La calidad que ofrecen los alimentos que han sido congelados suele ser una consecuencia directa de una serie de factores bastante bien conocidos y estudiados, entre los que caben destacar dos: la velocidad con la que ha sido llevada a cabo la congelación y el tamaño de los cristales que se han formado en la estructura del alimento dentro y fuera de las células (Bello-Gutiérrez, 2000; Paciulli *et al.*, 2014).

La velocidad de congelamiento determina la formación y localización de los cristales de hielo; cuando se hace rápidamente (en minutos a muy baja temperatura), se producen muchos cristales pequeños redondeados a lo largo de las fibras del alimento; por el contrario, si se efectúa en forma lenta, se induce un menor número

de cristales pero de mayor tamaño, de tal manera que cada célula contiene una sola masa central de hielo. El congelamiento lento es más dañino que el rápido ya que afecta mayormente la membrana celular y además establece cristales intercelulares que tienen la capacidad de unir las células e integrar grandes agregados (Badui, 2006).

En el proceso de ultracongelación los cristales de hielo son muy pequeños y por lo tanto causan mucho menor daño a las células. Siendo el periodo de congelación más corto, hay menos tiempo para difusión de sales y para la separación de agua en forma de hielo. El producto se enfría rápidamente por debajo de la temperatura a la cual se verifica el desarrollo de las bacterias, mohos y levaduras evitando así la descomposición durante el enfriamiento, con ella se reducen a un mínimo la destrucción de los tejidos, la actividad de las enzimas, la oxidación, las fermentaciones y el desarrollo de los microorganismos, Acerate (1950) menciona que la congelación, aunque sea rápida, modifica en algún sentido la permeabilidad de los tejidos vegetales, está comprobado que espárragos y guisantes congelados pierden al cocerlos más substancias soluble que las mismas hortalizas frescas. La congelación rápida disminuye este efecto; los guisantes así congelados resultan más parecidos a los frescos, después de cocidos.

En la Figura 1.4 se muestran las curvas de congelación respecto a tres sistemas I, II y III, donde el I y II difícilmente trabajan a temperaturas inferiores de los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por lo que A y B presentan una cristalización lenta y forman cristales grandes, estos procesos son conocidos como congelación, el proceso III trabaja por debajo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un tiempo no mayor a 30 minutos dando lugar a la formación de numerosos cristales pequeños de hielo, este proceso es conocido como ultracongelación.

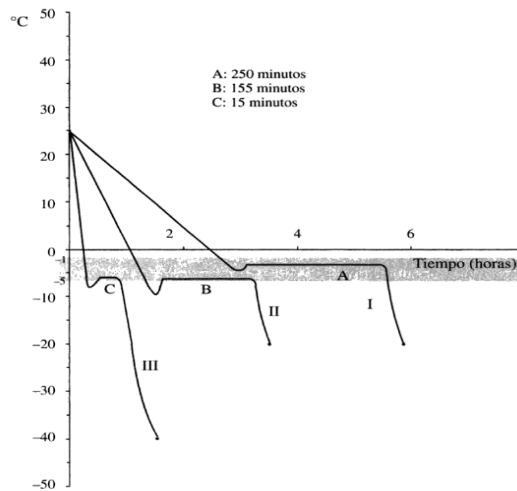


Figura 1.4 Representación gráfica del proceso de congelación bajo tres niveles de intensidad (I, II, III) para determinar la capacidad de enfriamiento (Bello-Gutiérrez, 2000).

1.2.1 Ventajas de la ultracongelación

Cuanto más rápida es la congelación, menor es la cantidad de agua que expulsan las células y por esta razón, son más reducidos los cristales de hielo que se forman en el exterior de dichas células. La textura resultante en la congelación rápida es mejor que en la lenta, debido a que el tejido es menos afectado por el proceso y tiene menor parecido con el existente antes del proceso de congelación (Barreiro y Sandoval, 2006). En consecuencia al descongelar la pieza, se produce un reblandecimiento menor.

Para todos los productos en general, ultracongelar conserva las cualidades iniciales del producto: aspecto, sabor, perfume, vitaminas y consiguiente valor nutritivo, además de que permite la detención de todo proceso biológico y bacteriológico, preservando al máximo la estructura de los tejidos debida a la alteración causada por la formación de cristales de hielo demasiado grandes que hacen peligrar la envoltura de las células (Bello-Gutiérrez, 2000).

1.3 Liofilización

La liofilización es un proceso de secado mediante sublimación, utilizado para la conservación de productos alimenticios, detiene el crecimiento de microorganismos (hongos, mohos, etc.), inhibe el deterioro del sabor y color por reacciones químicas, enranciamiento y pérdida de propiedades fisiológicas, las cuales se pierden durante los procesos convencionales de secado y facilita el almacenamiento y la distribución del producto liofilizado (Kasper *et al.*, 2013; Ratti, 2001).

A diferencia de lo que ocurre con el secado convencional por aire caliente, con la liofilización el encogimiento del alimento es mínimo; el aspecto, la textura, el sabor y el aroma no se pierden, se intensifican y se mantienen las características nutricionales (Orrego, 2008). A pesar de la gran pérdida de peso, los productos obtenidos mantienen el volumen y la forma original y el material es fácilmente rehidratable (Mayer *et al.*, 2006). Los alimentos deshidratados son muy útiles cuando no es posible conseguir alimentos frescos a la mano como es el caso de los astronautas, o cuando se desean conservar por un considerable período de tiempo (Aguilera y Stanley, 1999). La Figura 1.5 muestra la configuración básica de un sistema de liofilización.

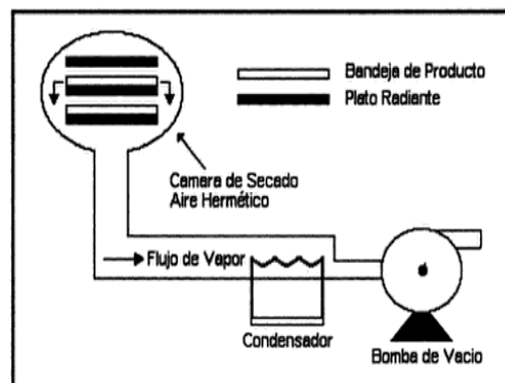


Figura 1.5 Sistema básico de liofilización (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

Los productos liofilizados pueden ser almacenados por largos periodos y al mismo tiempo mantienen las propiedades fisicoquímicas, biológicas y organolépticas del estado fresco, además pueden ser reconstituidos a su forma y estructura original al ser rehidratado (Ramírez-Navas, 2006).

La liofilización reduce pérdidas de calidad debido al deterioro causado por reacciones químicas causadas por crecimiento enzimático. Este proceso consiste principalmente de dos etapas: (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, 2008).

1.3.1 Etapa de congelación

La temperatura y tiempo de congelación de los productos alimenticios está en función de los solutos que contiene la solución. La temperatura de congelación para el agua pura permanece constante en el punto de congelación hasta que el agua es congelada. En el caso de los productos alimenticios la temperatura de congelación es más baja que la del agua pura debido a que los solutos están más concentrados en la porción sin congelar de la mezcla (Barbosa-Cánovas e Ibarz, 2003). 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 la transferencia de calor y masa en las etapas siguientes de la liofilización (Reyes *et al.*, 2008).

1.3.2 Etapas de secado por sublimación

Reyes *et al.* (2008) explican las dos etapas que son distinguidas en la etapa de secado por sublimación:

Etapa primaria: debido al calentamiento de la muestra, la tasa de sublimación incrementa rápidamente hasta alcanzar el máximo. El tiempo requerido para esta etapa es relativamente corto, el agua eliminada en esta etapa es alrededor del 65 al 90%, la sublimación tiene lugar solo en esta etapa.

Etapa secundaria: involucra la remoción del agua sin congelar (agua ligada); inicia cuando el hielo se ha eliminado por sublimación. El agua ligada (10-35% total de contenido de humedad) aparece mediante dos mecanismos: adsorción y cristalización del agua. El proceso de eliminación de agua ligada es más lento y esto afecta de manera general el tiempo de secado.

La liofilización da lugar a productos alimenticios de alta calidad en comparación 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. Al añadir agua posteriormente, el producto rehidratado recupera la mayor parte de su estructura original. La liofilización de materiales biológicos y alimenticios también tiene la ventaja de que conserva su sabor o aroma. Las temperaturas bajas que se emplean reducen al mínimo las reacciones de degradación que casi siempre ocurren en los procesos comunes de secado. Sin embargo, la liofilización es una forma de deshidratación de alimentos bastante costosa, debido a la velocidad lenta de secado y a la necesidad de usar vacío (Geankoplis, 1998).

1.4 Propiedades fisicoquímicas en los alimentos

La deshidratación de alimentos a nivel mundial es el método de conservación más utilizado para alargar la vida útil de los alimentos, durante este proceso se producen cambios físicos y químicos que definen las características finales, vida útil y costo del producto deshidratado (Ceballos y Jiménez, 2012).

El estudio de técnicas y condiciones adecuadas de deshidratación de alimentos es necesario para conocer y minimizar los cambios físicos y químicos ocurridos durante la deshidratación, así como mantener sus propiedades nutrimentales, sensoriales y de vida de anaquel, y por lo tanto, desarrollar nuevos productos deshidratados de alta calidad atractivos a los consumidores y con alto valor nutricional (Ceballos y Jiménez, 2012).

La liofilización utilizada como técnica de deshidratación ayuda a minimizar estos cambios físicos y químicos, a mejorar la estabilidad de los alimentos y tiene la finalidad de obtener productos de alta calidad y con bajo riesgo de degradación microbiana.

1.4.1 Actividad de agua

El término “actividad de agua” establece el grado de interacción del agua con los demás constituyentes de los alimentos, y es una medida indirecta del agua disponible para llevar a cabo las diferentes reacciones a las que están sujetas estas sustancias químicas o para el desarrollo microbiano (Herrera *et al.*, 2003).

La actividad de agua a_w es la relación que existe entre la presión parcial del vapor de agua contenida en el alimento (p) con respecto a la presión parcial de vapor de agua pura (p_0) a la misma temperatura.

Matemáticamente se define como:

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{HR}{100} \quad (1.1)$$

De acuerdo a la Ecuación 1.1, la actividad de agua representa la humedad relativa (HR) ambiental que se encuentra en equilibrio termodinámico con el agua presente en el alimento. El agua pura tiene una actividad de agua de 1 (Barreiro y Sandoval, 2006; Troller, 2012).

La actividad de agua refleja el grado de interacción con los demás constituyentes, además de que se relaciona con la formulación, el control de procesos de deshidratación y de rehidratación, la migración de la humedad en el almacenamiento y muchos otros factores (Millán *et al.*, 2001).

Después de la temperatura, la a_w es considerado uno de los parámetros más importantes en la preservación de alimentos, además de ser un parámetro para controlar el crecimiento de microorganismos (Barbosa-Cánovas *et al.*, 1996).

El agua en los alimentos se puede clasificar de la siguiente forma: agua libre, (constituida por el agua superficial), agua de hinchamiento, agua retenida en capilares y agua atada, (formada por el agua absorbida o ligada por enlaces iónicos o fuerzas de Van der Waals y puentes de hidrogeno) y finalmente el agua de rehidratación química. El agua libre es capaz de sostener crecimiento microbiológico y ser vínculo para reacciones bioquímicas asociadas al deterioro, de esta agua dependen las propiedades reológicas y de textura del alimento; el agua atada sin embargo, no participa en estas reacciones (Barreiro y Sandoval, 2006).

Las técnicas de preservación de alimentos se basan en la reducción de a_w , así como reducir los rangos de crecimiento microbiológico y reacciones químicas, la Figura 1.6 muestra las reacciones bioquímicas y sus interacciones sobre la estabilidad de los alimentos. Cuando la actividad de agua se encuentra por debajo de 0.6, los microorganismos no pueden crecer en alimentos deshidratados (Núñez-Galindo, 2016).

Las reacciones de deterioro de tipo químico y bioquímico se deben considerar de manera global; así por ejemplo, las tasas de reacciones de tipo enzimático tienden a disminuir al reducir la a_w ; sin embargo, las reacciones de oscurecimiento presentan un máximo entre 0.5 y 0.7. Las reacciones de oxidación de lípidos disminuyen con la a_w hasta alcanzar un mínimo de valores entre 0.2 y 0.3; no obstante, una disminución ulterior aumenta drásticamente las tasas de reacción, debido a la remoción de la mono capa que actúa como barrera protectora, quedando expuestos los lípidos en el alimento al oxígeno del aire y por ende haciéndolos susceptibles a la oxidación (Barreiro y Sandoval, 2006).

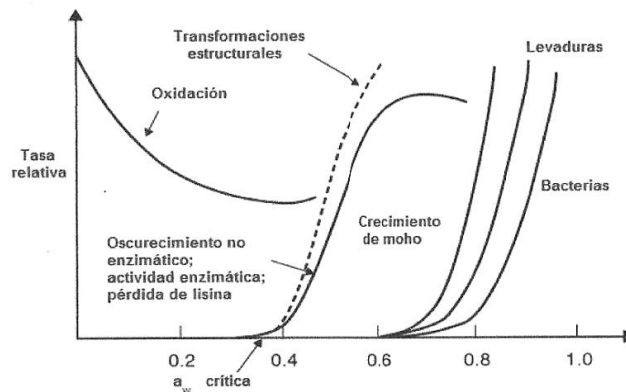


Figura 1. 6 Estabilidad microbiológica y térmica del alimento, crecimiento microbiológico, reacciones químicas y bioquímicas en función de la a_w (Badui, 2006.).

1.4.2 Humedad

El contenido de humedad de un alimento es el agua total que este posee sin embargo, cabe destacar que en la mayoría de los alimentos existen zonas o regiones microscópicas que debido a su composición química no permiten la presencia del agua, lo cual provoca una distribución heterogénea a través de todo producto (Herrera *et al.*, 2003).

El contenido de humedad de un sólido puede expresarse sobre base seca o base húmeda. En los cálculos de secado resulta más conveniente referir a la humedad a base seca (Ecuación 1.2) debido a que esta permanece constante a lo largo del proceso de secado (Bello-Luna, 2012) por lo tanto, a no ser que se indique lo contrario, se entenderá por humedad de un sólido el peso de agua que acompaña a la unidad de peso del sólido seco (Singh y Heldman, 1998).

$$X = \left(\frac{m_x - m_s}{m_s} \right) * 100 \quad (1.2)$$

Donde:

X= contenido de humedad

m_x = contenido de humedad de la muestra húmeda

m_s = contenido de humedad de la muestra seca

1.4.3 Color

El color es un atributo de apariencia de los productos; su observación permite detectar ciertas anomalías y defectos. En la industria alimentaria, el color es un parámetro en base al cual se realizan clasificaciones de productos, se evalúan materias primas, se hace control de procesos y se miden indirectamente otros parámetros (Delmoro *et al.*, 2010). El color suele ser considerado como un factor psicológico de aceptación y un criterio para elegir un alimento; en los productos de origen vegetal se relaciona con la posibilidad de distinguir su grado de maduración y su idoneidad (Bello-Gutiérrez, 2000).

El color se describe en términos de tono, intensidad y brillo. El tono está dado sobre la base de los tres colores primarios: rojo, verde, azul. Un tono azul puede describirse como más rojizo o más verdoso que otro azul, y también puede ser más intenso o más brillante (Konica Minolta).

El espacio de color Hunter Lab fue desarrollado en 1948 por R.S. Hunter como un espacio de color uniforme que podría ser leído directamente en un colorímetro fotoeléctrico (método triestímulo), el valor de L^* representa la luminosidad, su escala es de 0 a 100. Un blanco perfecto tiene un valor de 100 y un negro perfecto tiene un valor de 0 (Konica Minolta).

El parámetro a^* , define el componente rojo-verde; rojo para los colores positivos y verde para los colores negativos. El parámetro b^* , define el componente amarillo-azul; amarillo para los valores positivos y azul para los valores negativos. Los colores son tanto más saturados cuanto más separados se encuentran del centro gráfico los puntos que lo definen (Figura 1.7) (Villegas-Santiago *et al.*, 2011).

El proceso de secado cambia las características de la superficie del alimento y por lo tanto su color y reflectancia. Por lo general, cuanto más largo es el proceso de secado y más elevada la temperatura, mayores son las pérdidas de pigmentos (Quintana-Zaragoza *et al.*, 2009).

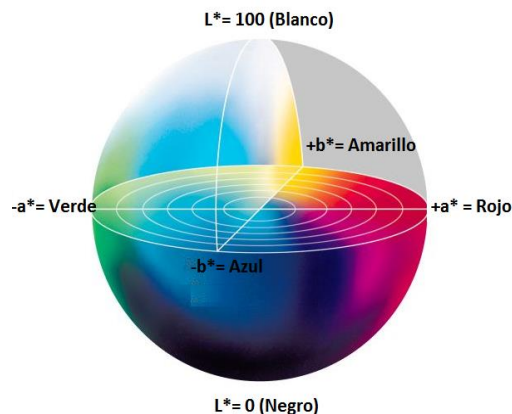


Figura 1. 7 Espacio de color Hunter L^* , a^* , b^* (Konica Minolta).

1.4.4 Grado de rehidratación

La rehidratación se considera como un método para poder evaluar la influencia del proceso previo de deshidratación al que se someten los alimentos con el objetivo de conservarlos; este proceso permite evaluar indirectamente el daño ocurrido en el alimento durante la deshidratación, considerándose como un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado sin o con pretratamientos al secado (Vázquez-Vila, 2007; Ergün *et al.*, 2016).

Una rápida y completa rehidratación es una importante propiedad de los productos secos. La capacidad de rehidratación es afectada significativamente por las condiciones de secado, pre tratamientos y características de textura de los productos deshidratados (Neumann, 1972; Mazza, 1983).

La mayoría de los productos deshidratados son generalmente rehidratados para su uso. Al rehidratar se pretende obtener productos que al reconstituirse adquieran lo más posible sus características iniciales y que lo hagan en el menor tiempo; sin embargo éste proceso se ve influido por las condiciones del secado, la preparación de la muestra, la composición de la muestra, el grado de ruptura estructural y química. La rehidratación de materiales deshidratados está compuesta de tres procesos simultáneos: inhibición del agua respecto al material deshidratado, el hinchamiento y la lixiviación de los sólidos solubles. Antes de rehidratar alimentos deshidratados, se deben conocer las características del alimento en su estado fresco y deshidratado, ya que las propiedades físico-químicas, mecánicas (microestructurales), sensoriales y nutricionales, cambian considerablemente de un producto fresco a deshidratado, de tal manera que estos factores determinan el comportamiento de los alimentos en el proceso de rehidratación (Yendi *et al.*, 2009).

1.5 Aplicación de diseños de experimentos en el proceso de secado

Los diseños experimentales de dos o más factores son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores (temperatura, longitud, presión, etc.), para estudiar el efecto conjunto de estos sobre una respuesta, existen varios casos del diseño factorial que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños de gran valor práctico. Este tipo de experimentos permite el estudio del efecto de cada factor sobre la variable de respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable (Montgomery, 2012).

Los diseños factoriales son muy importantes en el desarrollo de una experimentación, cada diseño experimental tiene la finalidad de expresar los mejores resultados y ayudar al experimentador a realizar las conclusiones exactas de acuerdo a los resultados obtenidos evitando así, realizar conclusiones incorrectas basadas en suposiciones. Un diseño factorial permite estimar los efectos de un factor en diversos niveles de los otros factores, produciendo conclusiones que son validas para un rango de condiciones experimentales (Montgomery, 2012).

1.5.1 Diseño de experimentos de tres factores

Suele representarse mediante una notación estándar, por ejemplo $3 \times 3 \times 2$, etc. Los términos en esta expresión se refieren a los tres factores A, B y C, en los niveles a, b y c respectivamente, en un diseño experimental completamente aleatorizado. El valor de cada término se refiere a la cantidad de niveles de la variable o factor. De la combinación de estos valores se obtiene la cantidad de grupos del diseño factorial de tres factores. La expresión $3 \times 3 \times 2$ indica que el primer factor tiene 3 niveles, el segundo factor 3 y el tercer factor tiene 2 niveles (Montgomery, 2012). En este caso el número de combinaciones (tratamientos) es de 18.

1.6 Estudios realizados sobre chayote (*Sechium edule*)

Solís-Ruiz *et al.* (2008) estudiaron el efecto del secado osmótico en las características fisicoquímicas de chayote (*Sechium edule*). Realizaron la deshidratación osmótica del chayote con soluciones acuosas de sal y sacarosa, 5-10% y 15-30% w/w respectivamente a diferentes temperaturas y formas (rodajas, tiras y cubos). Los mejores resultados se obtuvieron al deshidratar rodajas y cubos de chayote empleando una solución al 10% de NaCl a una temperatura de 35 °C. La a_w del chayote después de 120 minutos de deshidratación se mantuvo entre de 0.94-0.96.

Castillo-Reyes (2008) estudió el efecto de la concentración, tamaño de partícula y temperatura en las propiedades reológicas de suspensiones de chayote (*Sechium edule*). Encontró que las suspensiones de chayote deshidratado a concentraciones de ácido ascórbico mayores a 20% tienden a formar pastas y su comportamiento es no-Newtoniano pseudoplástico; mientras que las suspensiones de chayote fresco mostraron un comportamiento no-Newtoniano; además observó que a un tamaño de partícula de 1.40 mm y 3% de concentración se incrementó la viscosidad de la suspensión. En general, el comportamiento reológico del chayote deshidratado presentó grandes diferencias significativas con respecto al chayote fresco.

Pérez-Francisco *et al.* (2008) optimizaron las condiciones de secado por charolas del chayote (*Sechium edule*). Desarrollaron una metodología de superficie de respuesta, usando el contenido de humedad, diferencia de color, energía de consumo, producción y costo total como parámetros de respuesta. Obtuvieron las condiciones óptimas a una temperatura de secado de 63 °C, corte del chayote en rebanadas de 5 cm de diámetro, concentración de ácido ascórbico de 0.075%, teniendo como resultados humedad de 1.52%, diferencia de color de 11.65, cantidad de producción 0.0073 kgh⁻¹ y un costo total de \$30.58 kg.

Ruiz-López *et al.* (2010) estudiaron el efecto de la deshidratación osmótica sobre las cinéticas de secado por aire de chayote (*Sechium edule*) en cortes de 1x1x2 y 4x4x2 cm a las temperaturas de 50 y 60 °C y con velocidades de aire de 1.5 y 2.5 m/s. Las muestras se sometieron a un pretratamiento por 3 h en soluciones al 10 y 25% de NaCl; con este proceso se redujo una parte del contenido de humedad (entre el 20 y el 65%) siendo las muestras pretratadas al 25% de NaCl las que disminuyeron el contenido de humedad en menor tiempo.

Xotlanihua-Soto (2011) evaluó el efecto de las condiciones de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de chayote deshidratado (*Sechium edule*). Obtuvo los mejores resultados en cuanto a pérdida de peso, humedad, a_w y color en los experimentos donde el chayote se almacenó a 7 °C y 28 °C con nitrógeno a 90 días de almacenamiento, a estas condiciones las muestras almacenadas no presentaron diferencias significativas en sus propiedades fisicoquímicas.

1.7 Estudios realizados sobre liofilización

Santos-Sousa *et al.* (2015) estudiaron el efecto de la congelación y la presión de liofilización sobre la actividad antioxidante, textura y pardeamiento de la pulpa del aguacate *Persea americana Mill.* Las muestras fueron cortadas en cubos de 1 cm³ y ultracongeladas a -80 y -26 °C, la liofilización se llevó a cabo a diferentes presiones de vacío (0.12, 0.37 y 1.07 mbar) temperaturas en la cámara de vacío de (-40, -30 y -20 °C). Ellos encontraron que la formación de grandes cristales de hielo en las muestras congeladas inicialmente a -26 °C proporcionó tasas de secado lentas, en comparación con las muestras ultracongeladas a -80 °C las cuales requirieron menos tiempo de secado. Las pruebas de textura demostraron que la pulpa sometida a congelación rápida dió como resultado un producto más fuerte y con menor daño en su estructura comparado con las muestras congeladas en el congelador convencional. Los resultados confirman la influencia significativa de la congelación

sobre la liofilización y los parámetros de calidad de los productos como su actividad antioxidante y textura.

Ruijie *et al.* (2014) liofilizaron rodajas de manzana fuji (65 y 125 g) pre-tratadas con una solución anti-pardeamiento con 0.5% de ácido cítrico, 0.2% de bisulfito de sodio, 0.4% de cloruro de calcio y 0.5% de cloruro de sodio por 30 minutos y congeladas a -30 °C por 2 h, ellos trabajaron con 250, 500 y 750 g de muestra en el proceso de liofilización y encontraron que el contenido de agua disminuyó significativamente para las muestras de menor peso en un tiempo de 7 h y para las muestras de mayor peso esta disminución se observó después de 13 h de procesamiento. Respecto a la presión en el liofilizador 9.15 kPa fue el parámetro óptimo de presión para alcanzar valores inferiores al 20% de humedad.

Muñoz-López (2014) realizó un estudio del proceso de liofilización y rehidratación de variedad de ciruela mexicana (*Spondias purpurea L.*), encontró que para la obtención de un producto de ciruela con valor de $a_w < 0.6$ y humedad menor a 10% el tiempo adecuado del proceso de liofilización es de 300 minutos; respecto a la rehidratación en agua y leche obtuvo un volumen de las muestras rehidratadas entre un 93-96% de su volumen inicial.

Arias-Gómez *et al.* (2013) evaluaron el efecto de la liofilización sobre las cinéticas de secado y rehidratación de aguacate variedad Hass (*Persea americana Mill.*) deshidratado por liofilización. Determinaron que el aguacate Hass liofilizado presentó una humedad final inferior a 3.5%. La capacidad de retención de agua no mostró diferencias estadísticas significativas para las temperaturas de congelación empleadas (-20 y -80°C), la cinética de rehidratación máxima para el aguacate congelado a -80 °C fue mayor a las obtenidas a -20 °C. La mayor parte de la rehidratación ocurrió en los primeros 20 minutos del proceso, no hubo diferencia significativa entre la actividad enzimática (A.E.) del aguacate fresco con respecto

al deshidratado. Las cinéticas de rehidratación indicaron que la mejor temperatura °C de congelación para su posterior liofilización fue de -80 °C.

Ocaña (2013) realizó un trabajo de investigación sobre la obtención de uva liofilizada. Indicó que el tipo de uva adecuado para ser sometido al proceso de liofilización es la uva negra en corte de 15 mm, ya que posee el mejor rendimiento al momento de ser liofilizada y rehidratada en comparación con los otros tres tipos de uva (blanca 10 mm, blanca 15 mm, negra 10 mm). Establecieron que las condiciones de liofilización de uva (congelación -120 °C, presión de $1.8 \cdot 10^{-4}$ mbar, tiempo de 48 h) para la obtención de una mayor pérdida de agua.

Oikonomopoulou y Krokida (2012) estudiaron las propiedades estructurales de las papas, hongos y fresas deshidratados por liofilización. Congelaron los productos agrícolas por 72 h a -30 °C, la deshidratación se llevo a cabo por un periodo de tiempo de 24 h bajo las condiciones de presión absoluta de 0.06 y 1.50 mbar y a una temperatura de 70 °C en la cámara de vacío. Al final del proceso de liofilización se encontró un contenido de humedad entre 3-3.5% para las papas, de 5-6% para los hongos y de 6-7 para las fresas. Concluyeron que las condiciones empleadas afectaron significativamente las propiedades mecánicas y estructurales de los productos liofilizados; un decremento en la cámara de vacío durante la liofilización da un incremento en la porosidad y un decremento en la densidad aparente. De los productos estudiados, las papas presentaron la menor estructura porosa y los valores más altos de los parámetros de elasticidad y tensión de rotura.

CAPITULO 2
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Metodología general

La metodología general del proceso de ultracongelación y liofilización del chayote (*Sechium edule*) se presenta en la Figura 2.1. Este proceso consta de las siguientes etapas: selección y caracterización de la materia prima, acondicionamiento del chayote, ultracongelación y liofilización.

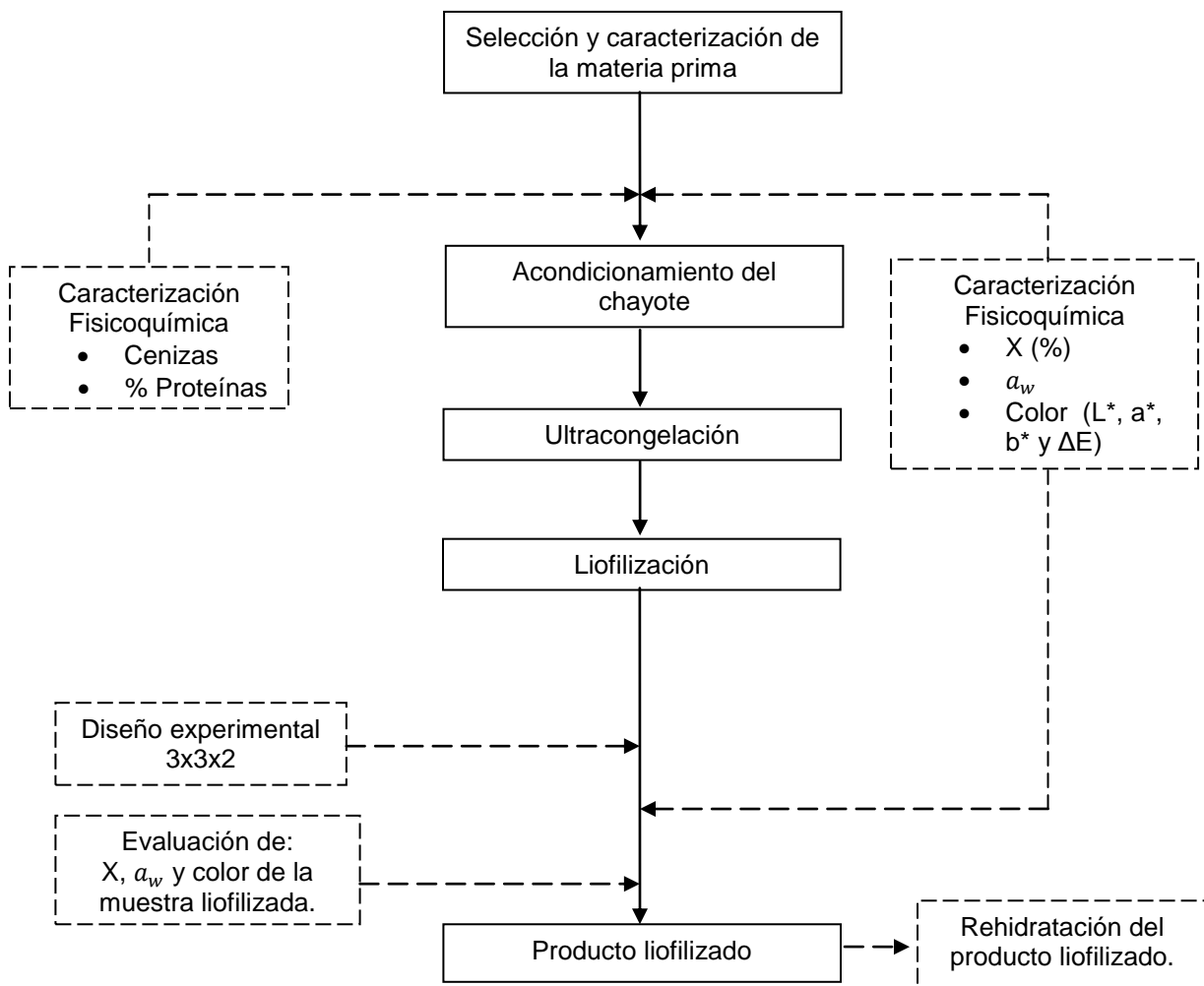


Figura 2. 1 Diagrama general del proceso de ultracongelación y liofilización en chayote.

2.2 Selección y caracterización de la materia prima

Durante el desarrollo de la investigación se utilizó chayote *Sechium edule* variedad *virens levis*, proporcionado por productores de la localidad de Campo Grande municipio de Ixtaczoquitlan, Veracruz. El chayote utilizado corresponde a una materia prima con calidad de exportación, completamente liso, sin espinas, peso entre 200-300 g, humedad promedio 92.81% y a_w de 0.994 aproximadamente.



Figura 2.2 Muestras de chayote (*Sechium edule*).

2.3 Acondicionamiento del chayote

Las muestras de chayote seleccionadas fueron lavadas y cortadas con un cortador manual en tres formas geométricas diferentes: rodajas ($\Phi=5$ cm y $\delta=0.5$ cm), cubos ($a=1$) y tiras ($L=7$ cm, 1 cm de ancho y $\delta=0.5$ cm) como se muestra en la Figura 2.3, con la finalidad de evaluar muestras con diferente área superficial.

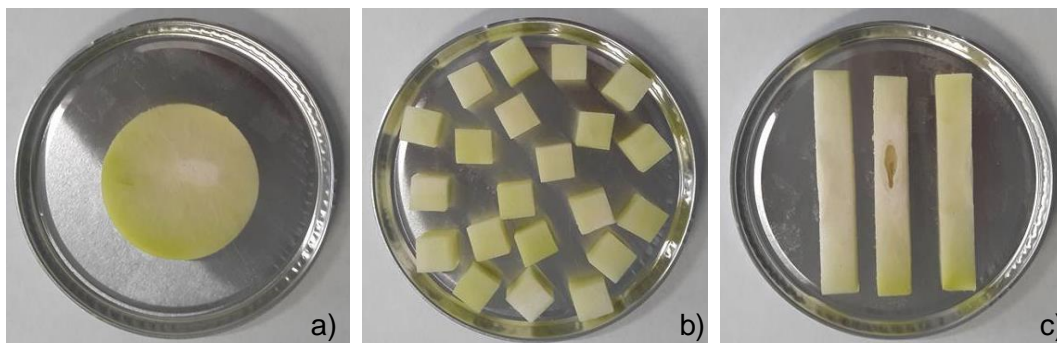


Figura 2.3 Acondicionamiento de las muestras: a) rodajas, b) cubos y c) tiras.

2.4 Proceso de ultracongelación

Las muestras de chayote seleccionadas, caracterizadas y acondicionadas fueron sometidas a un proceso de ultracongelación (Figura 2.4), el cual se llevó a cabo a -40, -60 y -80 °C.



Figura 2.4 Muestras de chayote sometidas a ultracongelación.

En esta etapa se utilizó un ultracongelador vertical SO-LOW con 5 compartimentos y un sistema de control de temperatura digital que muestra la temperatura programada y actual en el congelador (Figura 2.5).



Figura 2.5 Ultracongelador Vertical SO-LOW utilizado en el proceso de ultracongelación.

2.5 Proceso de liofilización

El proceso de liofilización de chayote en sus tres diferentes formas, se realizó en un liofilizador marca LABCONCO Modelo 742004 (Figura 2.6), el cual consiste en una cámara de secado de acero inoxidable tipo 304 con doce válvulas, capacidad de 12 L del colector, con un sistema de refrigeración de hasta $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sistema de control a vacío cuyo set-point se encuentra a 0.1 mbar. El liofilizador se encuentra en el laboratorio de Bioprocesos del Instituto Tecnológico de Orizaba.



Figura 2.6 Liofilizador LABCONCO Modelo 742004.

Para realizar el proceso de liofilización se fijó la presión de vacío requerida (0.05 y 0.1 mbar), las muestras de chayote previamente congeladas (-40 , -60 y $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) se introdujeron en los matracos de congelación y se adaptaron a los puertos de las válvulas de la cámara de secado y colector.

En el proceso de liofilización se tomaron muestras cada 3 h durante un periodo de tiempo de 24 h, tiempo en el cual se completo la liofilización del chayote, este tiempo fue establecido de acuerdo a pruebas preliminares, en las cuales se encontró que las

muestras de chayote se estabilizan en este lapso de tiempo alcanzando una humedad $< 10\%$ y $a_w < 0.6$. El muestreo se realizó cada 3 h con la finalidad de monitorear la evolución de las variables de respuesta a_w , X y color en el proceso.

2.5.1 Diseño de experimentos

Para evaluar el efecto que tienen las variables sobre el proceso de liofilización, se aplicó un diseño de experimentos con niveles mixtos con una variable cualitativa: forma de las muestras (rodajas, cubos y tiras) y dos variables cuantitativas: temperaturas de ultracongelación (-40, -60 y -80 °C) y presión del liofilizador (0.05 y 0.1 mbar), por lo cual el diseño de experimentos se expresó de la siguiente manera:

3x3x2

Los factores que se utilizaron en este diseño se pueden observar en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Factores y niveles del diseño de experimentos en el proceso de liofilización de chayote (*Sechium edule*).

Factores	Niveles		
Temperaturas de ultracongelación (T_{uc}) °C	-40 °C	-60 °C	-80 °C
Forma de muestra (F_m)	rodajas	cubos	Tiras
Presiones del liofilizador (P_{lio}) mbar	-	0.1mbar	0.05mbar

Se realizaron 18 experimentos con replica para minimizar el error experimental, los experimentos fueron elegidos al azar.

Las variables de respuesta en este diseño fueron X, a_w y color. En la Tabla 2.2 se muestran los niveles utilizados en cada uno de los factores del proceso de liofilización correspondientes al diseño con niveles mixtos 3x3x2.

Tabla 2.2 Diseño con niveles mixtos 3x3x2 aplicado al proceso de liofilización.

Experimento	T _{uc} (°C)	F _m	P _{lio} (mbar)
1	-40	rodajas	0.05
2	-40	rodajas	0.1
3	-40	cubos	0.05
4	-40	cubos	0.1
5	-40	tiras	0.05
6	-40	tiras	0.1
7	-60	rodajas	0.05
8	-60	rodajas	0.1
9	-60	cubos	0.05
10	-60	cubos	0.1
11	-60	tiras	0.05
12	-60	tiras	0.1
13	-80	rodajas	0.05
14	-80	rodajas	0.1
15	-80	cubos	0.05
16	-80	cubos	0.1
17	-80	tiras	0.05
18	-80	tiras	0.1

2.6 Caracterización fisicoquímica del chayote

Los análisis fisicoquímicos que se determinaron en el chayote fresco fueron: a_w , X, parámetros de color (L^* , a^* , b^* y ΔE), cenizas y proteínas. Los parámetros determinados antes y durante y el proceso de liofilización a los diferentes tiempos establecidos fueron: a_w , X y color (L^* , a^* , b^* y ΔE), con la finalidad de obtener cinéticas de la evolución de cada uno de estos parámetros en cada experimento realizado y con ello determinar la calidad y estabilidad del producto deshidratado por liofilización.

2.6.1 Actividad de agua

La actividad de agua es el mejor indicador del carácter perecedero de los alimentos (Bradley, 2010). Para la determinación de actividad de agua (a_w) en el chayote fresco y liofilizado se utilizó un medidor de actividad de agua marca AQUALAB serie 3 modelo TE, en condiciones de temperatura de 25 ± 1 °C. Este instrumento utiliza la técnica de punto de rocío para la medición de la a_w de una sustancia, donde la muestra se mantiene en equilibrio con el espacio principal de una cámara sellada que contiene un espejo y un medio de detección de condensación en este espejo. En equilibrio la humedad relativa del aire en la cámara equivalente a la actividad de agua de la muestra.

2.6.2 Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad (X) de las muestras de chayote se utilizó una termobalanza de halógeno marca OHAUS, modelo MB35. La determinación se llevó a cabo colocando un platillo de aluminio dentro de la cámara de secado, donde se depositó aproximadamente 1 g de muestra de chayote distribuyendo la muestra de manera homogénea, programándose a una temperatura de 65 °C y seleccionando el tiempo de secado en forma automática, al finalizar la medición la termobalanza proporcionó el valor de la humedad en base húmeda.

2.6.3 Análisis de color

El color se determinó mediante un colorímetro MiniScan XE plus, marca HunterLab, en el cual los datos de color se capturaron en una computadora integrada por medio del programa: Universal software versión 4.10, para de esta forma obtener la diferencia total del color.

La medición se llevó a cabo colocando muestra de chayote en el interior del equipo, adquiriendo así los parámetros de color correspondientes a la luminosidad L^* , a^* y b^* , con estos parámetros se obtuvo la diferencia de color (ΔE), que es un resumen matemático de los tres valores L^* , a^* y b^* que indica la composición de la diferencia total de color de la muestra al final del proceso de secado comparado con respecto a un estándar (Ecuación 2.1).

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

Donde:

$$\Delta L = L_{\text{final}} - L_{\text{inicial}} \quad [-] \quad (2.2)$$

$$\Delta a = a_{\text{final}} - a_{\text{inicial}} \quad [-] \quad (2.3)$$

$$\Delta b = b_{\text{final}} - b_{\text{inicial}} \quad [-] \quad (2.4)$$

2.6.4 Determinación de proteínas

La determinación de proteínas contenidas en el chayote se realizó mediante el método kjeldahl, empleando un digestor de proteínas marca NOVATECH para analizar nitrógeno orgánico. En esta técnica se digieren las proteínas del chayote y otros componentes orgánicos con ácido sulfúrico en presencia de catalizadores como sulfato de potasio y sulfato de cobre. El nitrógeno orgánico total es convertido en sulfato de amonio. La mezcla digerida se neutraliza con hidróxido de sodio al 30% y posteriormente se destila en una solución de ácido bórico al 3%. Los aniones del borato formados se titulan con ácido clorhídrico normalizado (0.1 N), los cuales se convierten en el nitrógeno de la muestra (Núñez-Galindo, 2016).

El contenido total de proteína cruda presente en las muestras de chayote se determinó mediante la Ecuación 2.2.

$$\% \text{ proteínas} = \frac{14 \times N \times V \times 100 \times \text{Factor}}{m \times 100} \quad (2.2)$$

Donde:

N: normalidad de HCl

V: volumen de HCl gastado (mL)

m: masa de la muestra empleada (g)

factor: factor de frutas y verduras 6.25

2.6.5 Determinación de cenizas

La determinación de cenizas es de gran importancia debido a que representan el contenido total de minerales en los alimentos. La determinación en seco es el método más utilizado para cuantificar la totalidad de minerales en alimentos y se basa en la descomposición de la materia orgánica en la muestra. En el chayote, el porcentaje de cenizas se determinó empleando una mufla FELISA modelo 330E, se pesaron de 3 a 5 g de muestra en una balanza analítica utilizando un crisol a peso constante. Se seco la muestra durante 2 horas a peso constante para posteriormente ser llevada a una mufla a 500°C para su calcinación.

Después de dos horas de calcinación se colocó la muestra en un desecador y posteriormente se pesó el crisol. El contenido de cenizas se calculó mediante la Ecuación 2.3.

$$\% \text{ cenizas} = \frac{\text{g de residuo fijo} \times 100}{\text{muestra seca}} \quad (2.3)$$

2.6.6 Grado de rehidratación

Las pruebas de rehidratación se realizaron mediante el método utilizado por Reyes *et al.* (2008), la capacidad de adsorción de las muestras se determinó pesando 0.5 g de muestra de chayote liofilizado en una balanza analítica electrónica Santorius modelo TE214S y sumergiéndola en 150 mL de agua destilada en un baño termostático a 4 diferentes temperaturas 20, 40, 60 y 80 °C, posteriormente las muestras se retiraron cada 2, 4, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, y 60 min. En las muestras excedente de humedad fue drenada con papel absorbente para eliminar el agua de la superficie y finalmente se registro su peso.

La capacidad de rehidratación se relaciona con las modificaciones en la estructura del alimento durante el proceso de secado, dicha capacidad fue calculada como la máxima cantidad de agua absorbida (g) por g de material deshidratado para cada experimento en los tiempos de rehidratación (Doymaz, 2007). Los experimentos fueron realizados por duplicado.

CAPÍTULO 3
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización fisicoquímica del chayote

Para el desarrollo del proceso de ultracongelación y liofilización de chayote (*Sechium edule*) se utilizó chayote cultivado en la región de Campo Grande municipio de Ixtaczoquitlan en el Estado de Veracruz, el cual se seleccionó y acondicionó de acuerdo a lo establecido en el capítulo 2. En la Tabla 3.1 se presenta el promedio de los resultados obtenidos de la caracterización del chayote fresco.

Tabla 3. 1 Caracterización fisicoquímica del chayote (*Sechium edule*).

Chayote (<i>Sechium edule</i>)	
a_w	0.988 ^{±0.003}
X (%)	90.380 ^{±0.325}
Cenizas (%)	0.353 ^{±0.028}
Proteínas (%)	0.877 ^{±0.094}
Color	
Parámetro de color L*	45.855 ^{±0.459}
Parámetro de color a*	-1.685 ^{±0.120}
Parámetro de color b*	7.710 ^{±0.820}

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 3.1) se observó que el contenido de proteínas, cenizas y humedad fueron similares a los reportados por Engels (1983) durante la caracterización de chayote *Sechium edule*. Debido a su alto contenido de humedad (90.38%) y actividad de agua (0.988), el chayote es considerado un producto altamente perecedero ya que, de acuerdo con la literatura, bacterias, hongos y levaduras crecen cuando los niveles de a_w se encuentran por arriba de 0.65 (Troller, 2012).

Se analizaron los parámetros de color L*, a* y b* del chayote fresco, los resultados indicaron que es un producto medianamente luminoso (45.85) de color verde amarillo.

3.2 Liofilización de chayote

Previo al proceso de liofilización se realizó el acondicionamiento y ultra congelación de las muestras de acuerdo a lo descrito en la sección 2.3 y 2.4. Las variables dependientes del proceso de liofilización fueron humedad, actividad de agua y diferencia de color, dichos parámetros fueron analizados para evaluar la calidad y estabilidad del producto liofilizado.

3.2.1 Resultados de actividad de agua del chayote liofilizado

La medición de la actividad de agua se determinó de acuerdo a lo establecido en la sección 2.6.1 durante un periodo de 24 h monitoreando la a_w cada 3 h; los resultados indicaron una reducción significativa en los niveles de actividad de agua durante las primeras 9 h del proceso tal como se muestra a continuación.

3.2.1.1 Cinéticas de evolución de actividad de agua

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente se desarrollaron las cinéticas de evolución de actividad de agua del chayote liofilizado a -40, -60 y -80 °C en tres formas (rodajas, tiras y cubos) y a dos presiones de vacío de 0.05 y 0.1 mbar.

Para cada uno de los 18 experimentos (Tabla 2.2) se realizó un análisis estadístico puntual con una prueba Dunnet y un $\alpha=0.05$, en el cual se observó una disminución de actividad de agua de chayote estadísticamente significativa en las dos presiones de liofilización estudiadas (Figura 3.1 y 3.2).

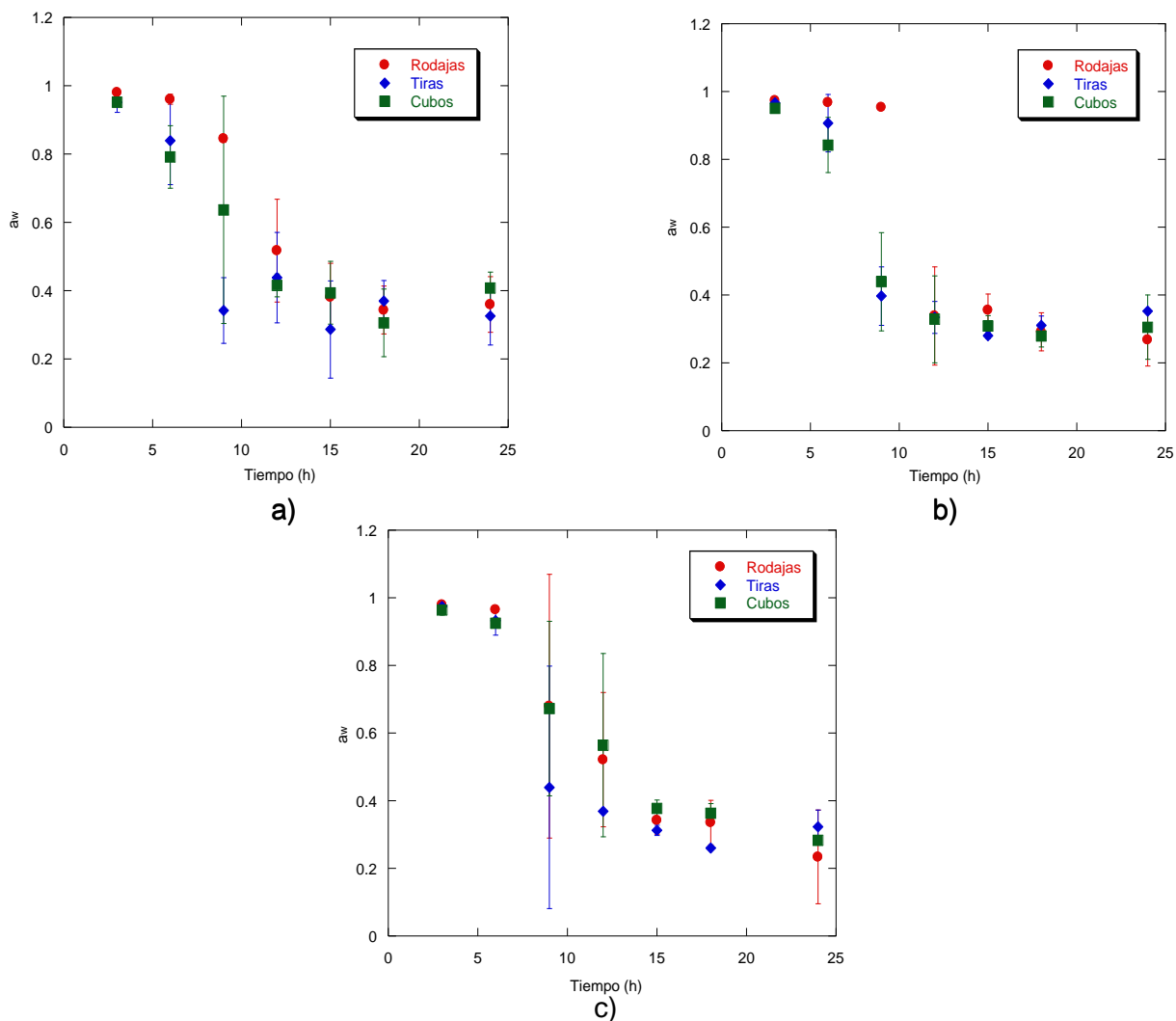


Figura 3.1 Evolución de la a_w del chayote durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar:
a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.

Como se puede observar a partir de la Figura 3.1, las tres cinéticas de evolución de actividad de agua presentaron un comportamiento similar a lo largo del proceso de liofilización; se observó una disminución de los valores de actividad de agua por debajo de 0.60 a partir de las 9 h para las tiras y de 12 h para las rodajas y cubos.

De acuerdo con la literatura, valores bajos de a_w proveen un alto grado de estabilidad microbológica y química debido a la remoción del agua presente en el alimento y permiten que grandes cantidades de alimento altamente perecedero

puedan ser conservadas y disponibles a través del tiempo (Mujumdar y Menon, 1995; Domínguez-Niño, 2014). El valor de a_w varía entre 0 y 1, por lo que los productos frescos perecederos tienen a_w altas, normalmente superiores a 0.9, los alimentos secos tienen a_w por debajo de 0.6 y por consiguiente son estables microbiológicamente (Welty-Chanes y Vergara-Balderas, 1997).

La Figura 3.2 muestra las cinéticas de evolución de actividad de agua en el proceso de liofilización de chayote a una presión de 0.1 mbar.

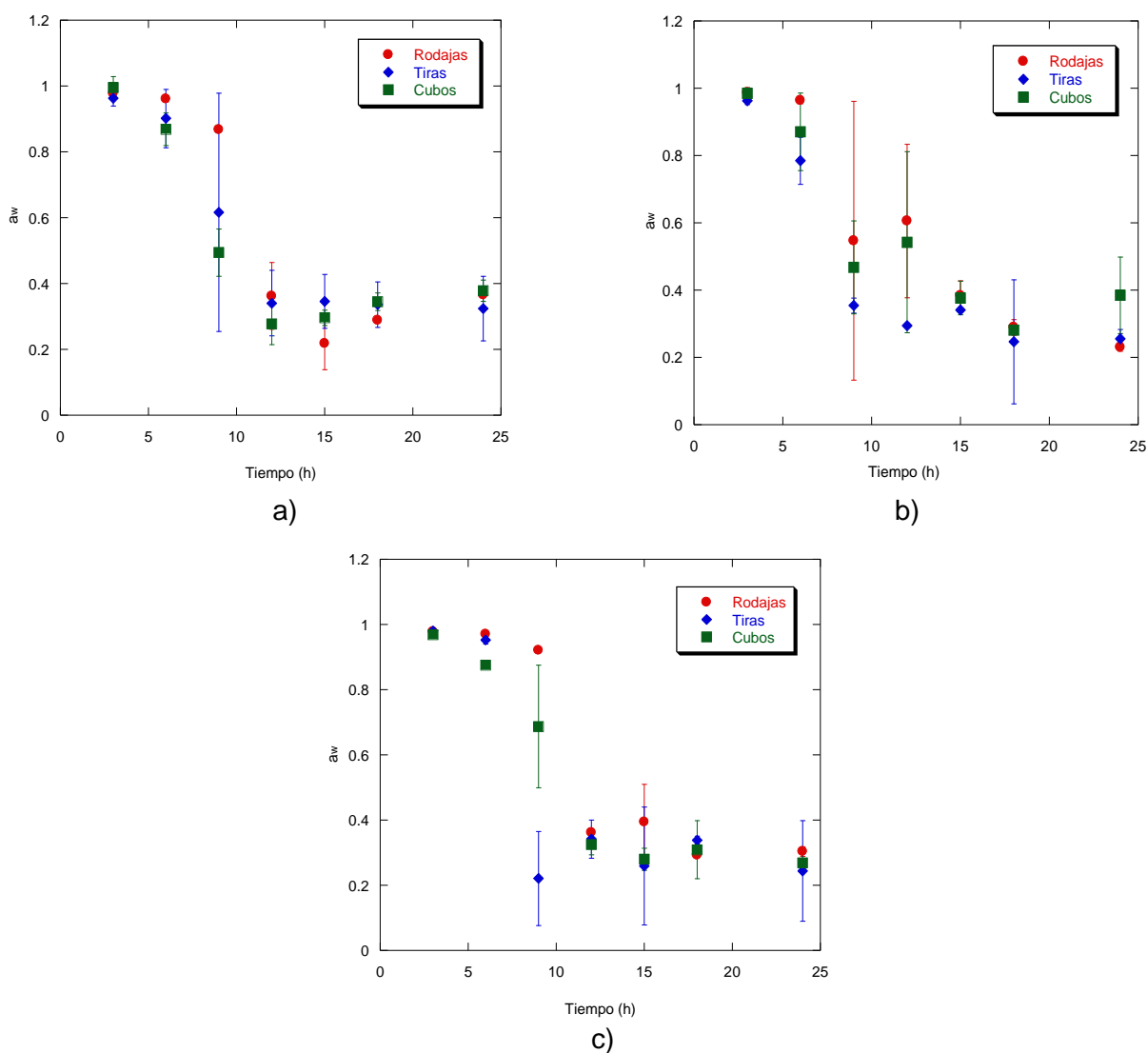


Figura 3.2 Evolución de la a_w del chayote durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.

Los resultados mostraron que la actividad de agua en las tiras a las temperaturas más bajas de -60 y -80 °C disminuyó significativamente a partir de las 9 h del proceso; en el caso de los cubos, alcanzaron una estabilidad a partir de las 9 h únicamente -40 y -60 °C, mientras que para el caso de las rodajas el valor de actividad de agua disminuyó a partir de las 12 h. De igual manera se logró observar que a una temperatura de ultracongelación de -60 °C las 3 formas de chayote alcanzaron su estabilidad a las 9 h de proceso. Según lo reportado por Marques *et al.* (2007) las diferencias en la tasa de disminución de a_w , se producen por los diferentes procesos de congelación utilizados que dan como resultado productos con estructuras porosas distintas.

La forma del chayote en tiras representa el tamaño de muestra con menor área superficial y fueron las formas que alcanzaron valores de actividad de agua menores a 0.6 en un tiempo menor en las dos presiones en el liofilizador y las tres temperaturas de ultracongelación utilizadas durante el proceso. Ruijje *et al.* (2014) en su estudio de liofilización de manzana encontraron que el tiempo de secado para obtener un alimento con un contenido de agua bajo depende directamente del tamaño de la muestra a liofilizar, ya que el tiempo de secado aumenta al aumentar el peso del producto fresco, principalmente porque la transferencia de calor durante la liofilización es calor por conducción; así mismo de acuerdo a lo anteriormente mencionado se atribuye a las rodajas (forma de chayote con mayor área superficial) el mayor tiempo de liofilización para alcanzar valores de a_w inferiores a 0.6.

3.2.1.2 Actividad de agua del chayote al final del proceso de liofilización

La Tabla 3.2 muestra los valores de actividad de agua al final del proceso de liofilización (24 h). El análisis estadístico con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) reveló que la presión no influyó de manera significativa sobre los valores de actividad de agua. De igual manera se observó que el experimento 10 (rodajas a -60 °C y 0.1 mbar)

proporcionó la menor actividad de agua (0.230) mientras que el experimento 3 (cubos a -40 °C y 0.05 mbar) proporcionó el valor más alto de a_w (0.408); sin embargo, ambas condiciones generan niveles de actividad de agua adecuados para evitar el crecimiento microbiano en las muestras de chayote liofilizado. Domínguez-Niño *et al.* (2016) mencionan que valores bajos de a_w proveen un alto grado de estabilidad microbiológica y química en el queso deshidratado debida a la remoción del agua presente en el alimento y permiten que grandes cantidades de alimento altamente perecedero puedan ser conservadas y disponibles a través del tiempo.

Tabla 3.2 Actividad de agua del chayote al final del proceso de liofilización.

Experimento	T _{uc} (°C)	F _m	P _{lio} (mbar)	a_w
1	-40	Rodajas	0.05	0.3595 ^{0.0813}
2	-40	Tiras	0.05	0.3260 ^{0.0848}
3	-40	Cubos	0.05	0.4080 ^{0.0466}
4	-40	Rodajas	0.1	0.3660 ^{0.0056}
5	-40	Tiras	0.1	0.3240 ^{0.0975}
6	-40	Cubos	0.1	0.3550 ^{0.0325}
7	-60	Rodajas	0.05	0.2680 ^{0.0777}
8	-60	Tiras	0.05	0.3525 ^{0.0063}
9	-60	Cubos	0.05	0.3050 ^{0.0947}
10	-60	Rodajas	0.1	0.2305 ^{0.0120}
11	-60	Tiras	0.1	0.2555 ^{0.0275}
12	-60	Cubos	0.1	0.3845 ^{0.1138}
13	-80	Rodajas	0.05	0.2340 ^{0.1385}
14	-80	Tiras	0.05	0.3230 ^{0.0494}
15	-80	Cubos	0.05	0.2830 ^{0.0141}
16	-80	Rodajas	0.1	0.3035 ^{0.0148}
17	-80	Tiras	0.1	0.2440 ^{0.1541}
18	-80	Cubos	0.1	0.2685 ^{0.0289}

Con respecto a las temperaturas de ultra congelación (-60 y -80 °C) el chayote liofilizado en la forma de tiras y rodajas proporcionó los valores más bajos de a_w (experimentos 10,13 y 17) mientras que la presión no tuvo influencia significativa.

En general, todas las corridas experimentales presentaron niveles finales de a_w entre 0.230 y 0.408 los cuales fueron considerados como aceptables para el almacenamiento del producto liofilizado (Ergün *et al.*, 2016).

3.2.2 Humedad del chayote durante el proceso de liofilización

La humedad es uno de los parámetros más importantes para determinar el tiempo de vida y estabilidad de un alimento, al tener valores inferiores a 0.10 g H₂O/g s.s. en peso de humedad se dice que el alimento se encuentra estable microbiológicamente (Domínguez-Niño *et al.*, 2016).

3.2.2.1 Cinéticas de evolución de humedad

En la Figura 3.3 se presentan las cinéticas de evolución de humedad durante la liofilización de chayote a una presión de 0.05 mbar.

De acuerdo a las cinéticas de evolución de humedad obtenidas, se observó claramente una disminución de humedad a partir de las 9 h en proceso a las temperaturas de ultracongelación de -40, -60 y -80 °C en la forma del chayote en tiras, a estas condiciones el contenido de humedad disminuyó a valores inferiores de 0.20 (g H₂O/g s.s.). A las temperaturas de ultracongelación de -40 y -60 °C se observó que después de las 12 h del proceso se alcanzó la estabilidad del producto con valores menores 0.10 (g H₂O/g s.s.) en las tres formas del chayote.

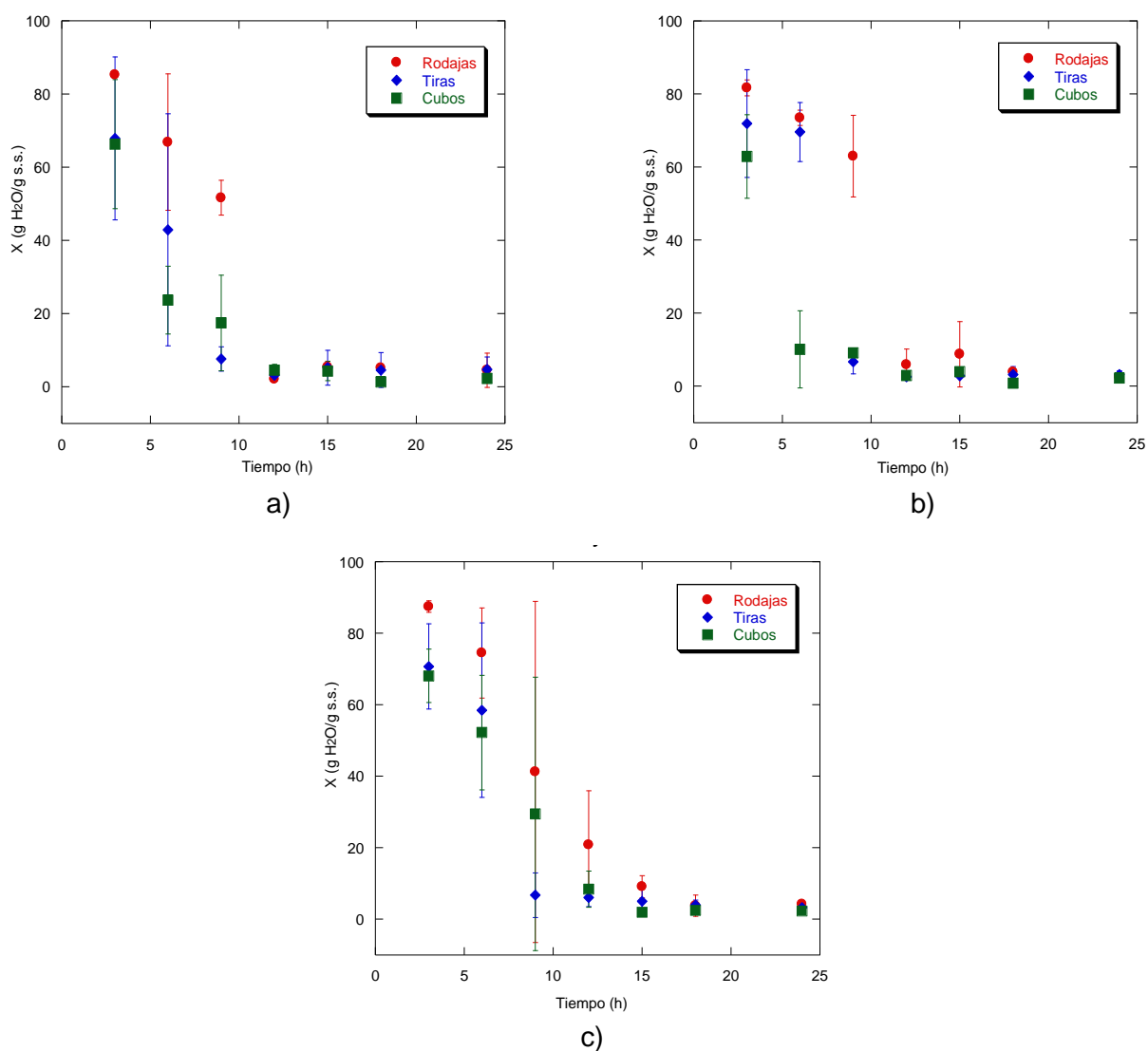


Figura 3.3 Evolución de la humedad del chayote durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.

En la Figura 3.4 se presentan las cinéticas de evolución de humedad durante el proceso de liofilización de chayote, se observó que el comportamiento de la humedad a 0.1 mbar de presión en el liofilizador no presentó diferencia estadísticamente significativa con respecto a la humedad que se obtuvo en los experimentos realizados a 0.05 mbar de presión.

Las cinéticas mostraron que a las 12 h del proceso las muestras de chayote liofilizadas a 0.1 mbar obtuvieron una humedad menor al 0.10 g H₂O/g s.s. en los tres tipos de forma a -40 y -80 °C (Figura 3.4a y 3.4c), para la temperatura de ultracongelación de -60 °C únicamente las tiras de chayote lograron alcanzar valores inferiores al 0.10 g H₂O/g s.s. de humedad a las 12 h del proceso, este ultimo comportamiento se atribuye a que las tiras representan el área superficial más pequeña y por lo tanto el agua presente en ellas fue más fácil de ser removida por sublimación en comparación con las otras dos formas.

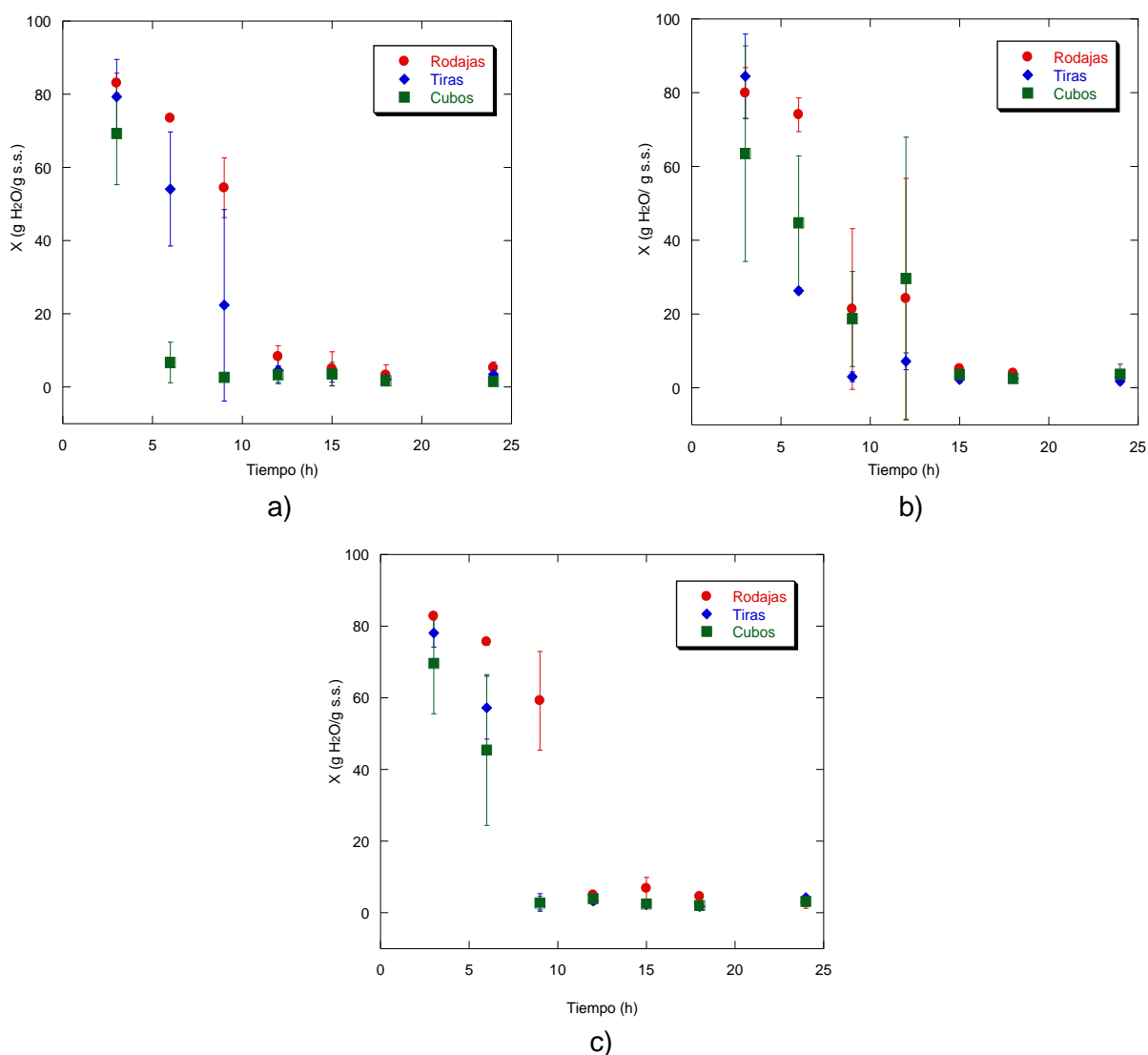


Figura 3.4 Evolución de la humedad del chayote durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.

La forma de chayote en rodajas representa el tamaño de muestra con mayor área superficial y esta forma fue la que tardó más tiempo en alcanzar humedades menores a 0.10 (g H₂O/g s.s.), estos resultados coinciden con los reportados por Santos-Souza *et al.* (2015) en su estudio de liofilización de aguacate, quienes señalan que el tiempo total de liofilización para tener un alimento microbiológicamente estable depende del espesor de la muestra y temperaturas de congelación.

De acuerdo a las cinéticas de evolución de humedad, el chayote fresco con humedad inicial promedio de 0.90380 g H₂O/g s.s. requirió un intervalo de tiempo entre 9 y 12 h en el proceso de liofilización para alcanzar valores de humedad inferiores al 0.10 g H₂O/g s.s., estos resultados coinciden con los reportados por Marques y Freire (2005) quienes reportaron tiempos de liofilización de 10, 11 y 13 h para la piña, guayaba y mango con humedades iniciales de 0.85, 0.90 y 0.90 g H₂O/g s.s. respectivamente.

3.2.2.2 Humedad del chayote al final del proceso de liofilización

En la Tabla 3.3 se muestra que el menor contenido de humedad (0.1535 g H₂O/g s.s.) se obtuvo a una temperatura de ultracongelación de -40 °C para el chayote en forma de cubo a una presión de 0.1 mbar (Experimento 6), mientras que la muestra liofilizada a -40 °C para chayote en forma de rodaja a una presión de 0.1 mbar (experimento 4) presentó el mayor contenido de humedad (0.5285 g H₂O/g s.s.).

De acuerdo con el análisis estadístico con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) la temperatura de ultracongelación y la presión de vacío no influyeron de manera significativa sobre el contenido de humedad del chayote; sin embargo, los cubos de chayote presentaron los valores menores de humedad.

Tabla 3.3 Humedad del chayote al final del proceso de liofilización.

Experimento	T _{uc} (°C)	F _m	P _{lio} (mbar)	X _f (%)
1	-40	Rodajas	0.05	4.545 ^{4.688}
2	-40	Tiras	0.05	4.735 ^{3.458}
3	-40	Cubos	0.05	2.320 ^{0.792}
4	-40	Rodajas	0.1	5.285 ^{1.549}
5	-40	Tiras	0.1	3.465 ^{0.714}
6	-40	Cubos	0.1	1.535 ^{0.431}
7	-60	Rodajas	0.05	2.485 ^{1.138}
8	-60	Tiras	0.05	3.210 ^{1.004}
9	-60	Cubos	0.05	2.200 ^{0.297}
10	-60	Rodajas	0.1	2.900 ^{1.796}
11	-60	Tiras	0.1	1.770 ^{0.424}
12	-60	Cubos	0.1	3.720 ^{2.729}
13	-80	Rodajas	0.05	4.200 ^{0.750}
14	-80	Tiras	0.05	3.280 ^{1.711}
15	-80	Cubos	0.05	2.335 ^{0.544}
16	-80	Rodajas	0.1	2.865 ^{1.563}
17	-80	Tiras	0.1	4.220 ^{0.580}
18	-80	Cubos	0.1	3.210 ^{0.863}

Al final del proceso de liofilización (24 h) se logró alcanzar un contenido de humedad de las muestras de chayote liofilizadas entre 0.1535 y 0.5285 g H₂O/g s.s., estos valores de humedad obtenidos coinciden con los reportados por Oikonomopoulou y Krokida (2012) quienes evaluaron el proceso de liofilización de 24 h de papas, hongos y fresas obteniendo valores de humedad entre 3-3.5% para papas, 5-7% para hongos y 6-7% para fresas a una presión de vacío de 0.06 y 1.5 mbar.

El objetivo principal del proceso de liofilización de chayote es reducir el contenido de humedad por debajo del 10%, con la finalidad de que los microorganismos dejen de estar activos; sin embargo algunos autores como Villegas-Santiago *et al.* (2011)

recomiendan reducir el porcentaje de humedad en un alimento por debajo del 5% en peso con la finalidad de preservar su sabor característico y valor nutritivo.

El análisis estadístico con prueba de Tukey y $\alpha=0.05$ (Apéndice B) mostró que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las humedades de los 18 experimentos estudiados al final del proceso de liofilización de 24 h.

3.2.3 Color del chayote durante el proceso de liofilización

En la industria alimentaria, el color es un parámetro en base al cual los consumidores aceptan o rechazan los productos; los atributos de calidad de los alimentos dependen de las condiciones y métodos a los que fueron sometidos, hasta hoy en día dentro de la tecnología de deshidratación, la liofilización es una alternativa atractiva para la obtención de productos secos con calidad en sus propiedades debido a que este proceso mejora la preservación de los nutrientes al ser sometidos a bajas temperaturas, retiene el color, aroma y sabor de los alimentos (Oikonomopoulou y Krokida, 2012).

Es importante para esta sección de resultados del color tener presente que en los parámetros de color L^* , a^* y b^* reportados en la Tabla 3.1, el chayote fresco presentó una L^* de 45.85, y valores de cromaticidad $a^*=-1.685$ y $b^*=7.71$, los cuales indicaron que el chayote es un producto medianamente luminoso de color verde-amarillo.

3.2.3.1 Cinéticas de evolución del parámetro de color L^*

En las Figuras 3.5 y 3.6 se presentan los resultados obtenidos del parámetro (L^*) luminosidad para cada una de las corridas experimentales a presiones de vacío de 0.05 y 0.1 mbar para las diferentes formas de chayote (rodajas, tiras y cubos) previamente ultracongeladas (-40, -60 y -80 °C).

El análisis estadístico puntual con prueba de Dunnett ($\alpha=0.05$) indicó que el experimento 6 (cubos a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.1 mbar , Figura 3.6a) a partir de las 18 h y el experimento 17 (tiras a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.1 mbar , Figura 3.6c) únicamente a las 12 h del proceso presentaron una disminución significativa de la luminosidad durante el proceso de liofilización.

Por otra parte, la temperatura de ultracongelación de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, las dos presiones del liofilizador y el chayote en forma de rodajas (Figuras 3.5a y 3.6a) no mostraron diferencias significativas en el parámetro L^* durante el proceso con respecto a la muestra fresca. Sin embargo, en la forma de chayote en tiras a 0.05 mbar de presión las muestras disminuyeron su luminosidad y con 0.1 mbar no hubo efecto significativo. Finalmente los cubos a 0.05 mbar de presión y $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ aumentaron su luminosidad y a la presión de 0.1 mbar L^* disminuyó durante todo el proceso; de acuerdo a Muñoz-López (2014) y Hammami y René (1997), el aumento en la luminosidad de vegetales sometidos a un proceso de liofilización es un fenómeno atribuido a la congelación inicial del alimento (velocidad y temperatura) y al efecto de la reducción de agua.

Respecto a la temperatura de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, las rodajas liofilizadas a la presión de 0.05 mbar aumentaron su luminosidad en las primeras 12 h del proceso y a la presión de 0.1 mbar disminuyó el parámetro L^* a partir de las 6 h. Las tiras y los cubos en ambas presiones en el liofilizador disminuyeron su luminosidad durante todo el proceso (a partir de las primeras 3 h hasta finalizar el proceso de 24 h) con respecto al valor del parámetro L^* del chayote fresco (Figuras 3.5b y 3.6b).

Finalmente, las rodajas ultracongeladas a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y liofilizadas a una presión de vacío de 0.05 mbar presentaron un comportamiento inestable durante el proceso de liofilización, estas presentaron un incremento en el parámetro L^* durante las primeras 6 h del proceso, el cual posteriormente disminuyó. Para las rodajas liofilizadas a una presión de 0.1 mbar esta disminución se observó a partir de las 9 h.

En la forma de chayote en tiras la menor presión empleada (0.05 mbar) causó un decremento en el parámetro L^* mostrando una disminución de la luminosidad a partir de las 6 h del procesamiento. En los cubos ultracongelados en ambas presiones de vacío empleadas el parámetro de color L^* disminuyó a partir de las primeras 3 h del mismo (Figuras 3.5c y 3.6c).

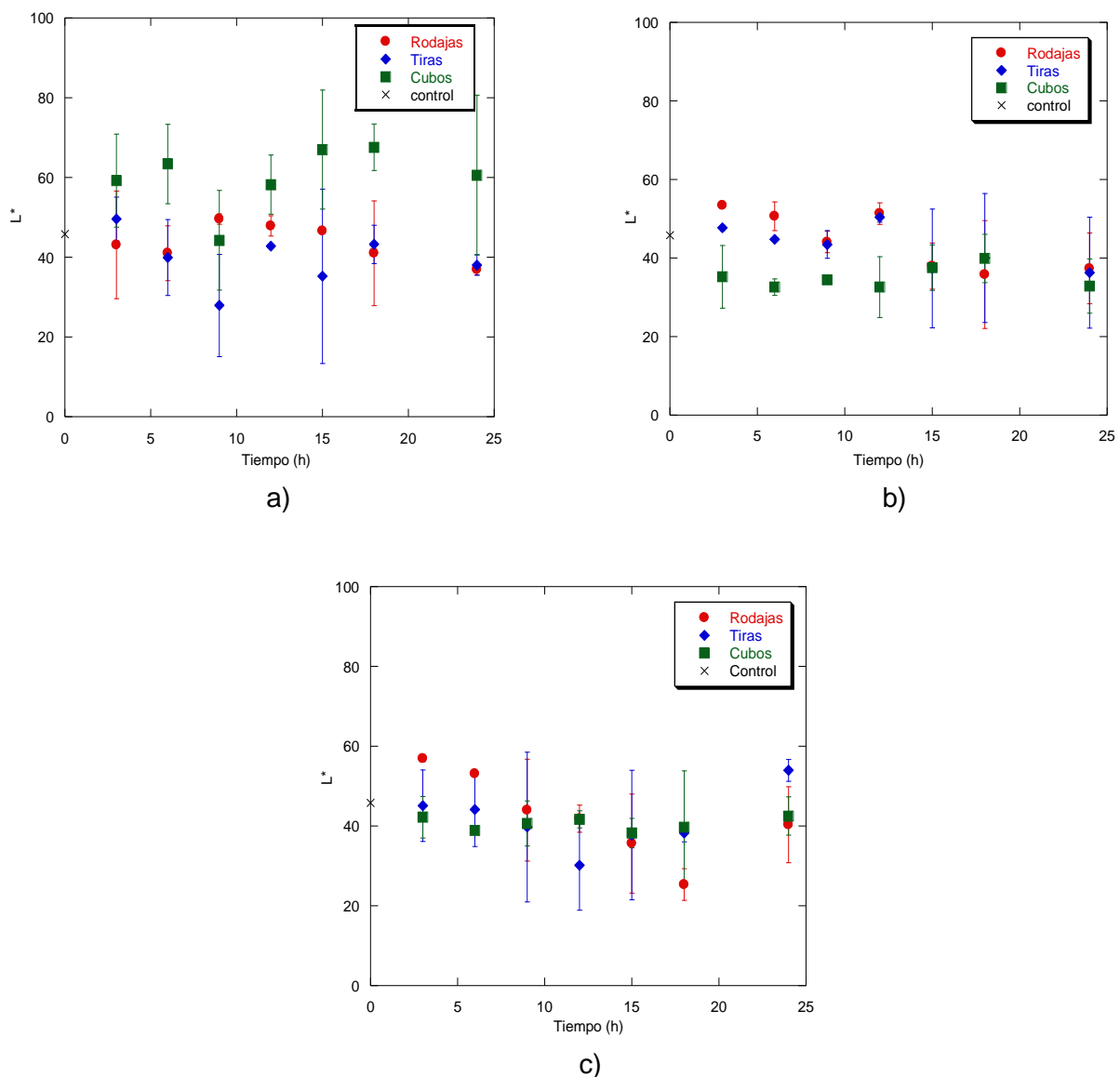


Figura 3.5 Evolución del color del chayote (parámetro L^*) durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.

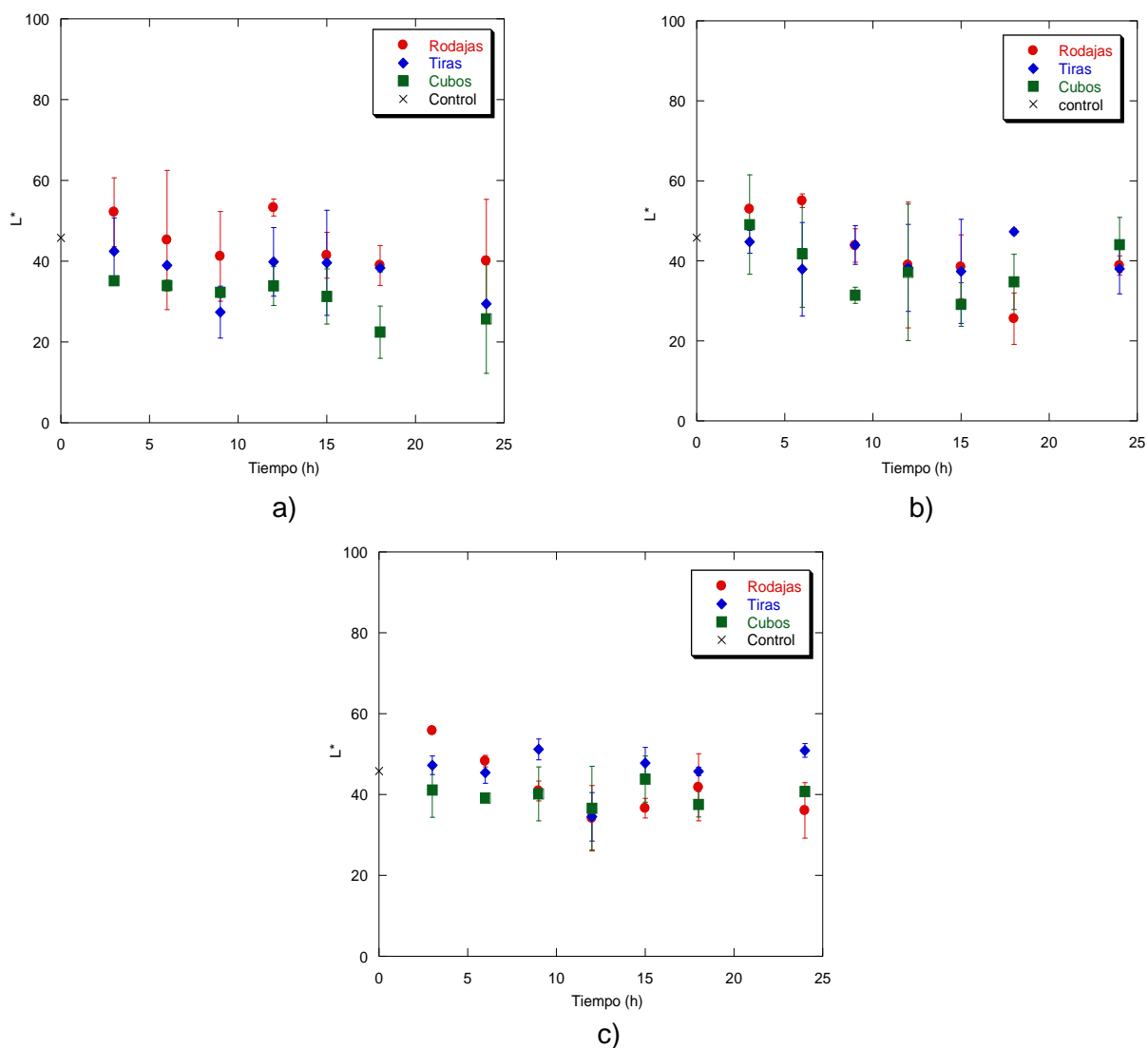


Figura 3.6 Evolución del color del chayote (parámetro L^*) durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C.

Durante todo el proceso se presentó una ligera disminución del parámetro L^* pero no fue significativa, Caparino *et al.* (2012) en su estudio del efecto de los métodos de secado sobre las propiedades físicas y micro estructurales de mango igualmente encontraron una disminución insignificante del parámetro L^* y le atribuyeron la similitud entre el valor del parámetro L^* de las muestras sometidas al proceso de liofilización y la muestra fresca a un efecto insignificante sobre la reflectancia.

3.2.3.2 Cinéticas de evolución del parámetro de color a^*

El parámetro de color a^* indica que tan rojo o verde es el alimento, en el caso del chayote los valores del parámetro a^* resultaron negativos lo cual indica que el chayote presenta una coloración verde.

Los datos obtenidos del parámetro de color a^* de las muestras de chayote liofilizadas a las diferentes condiciones de temperaturas de ultracongelación, tipo de corte y presión de vacío se muestran en las Figuras 3.7 y 3.8.

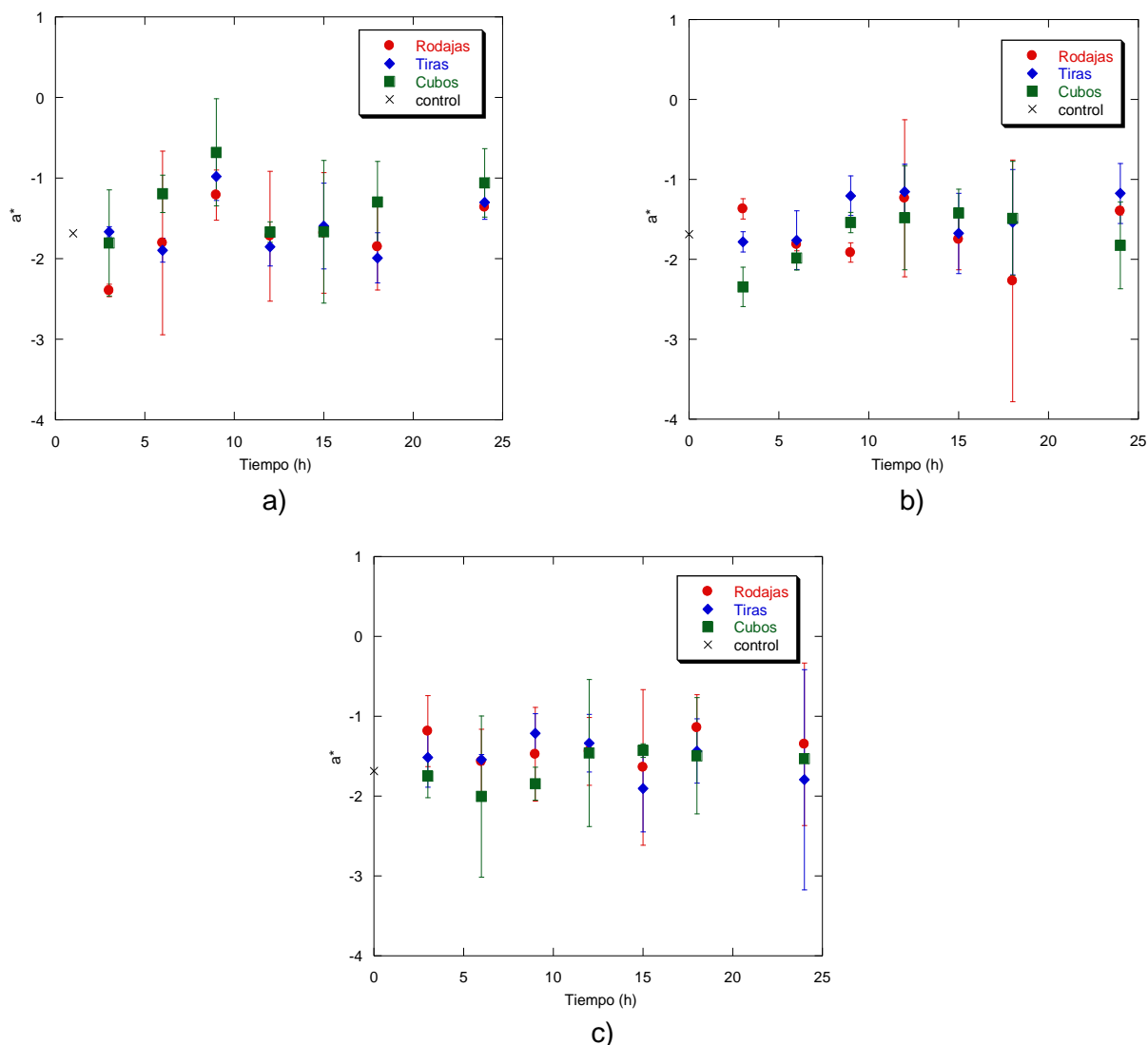


Figura 3.7 Evolución del color del chayote (parámetro a^*) durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.

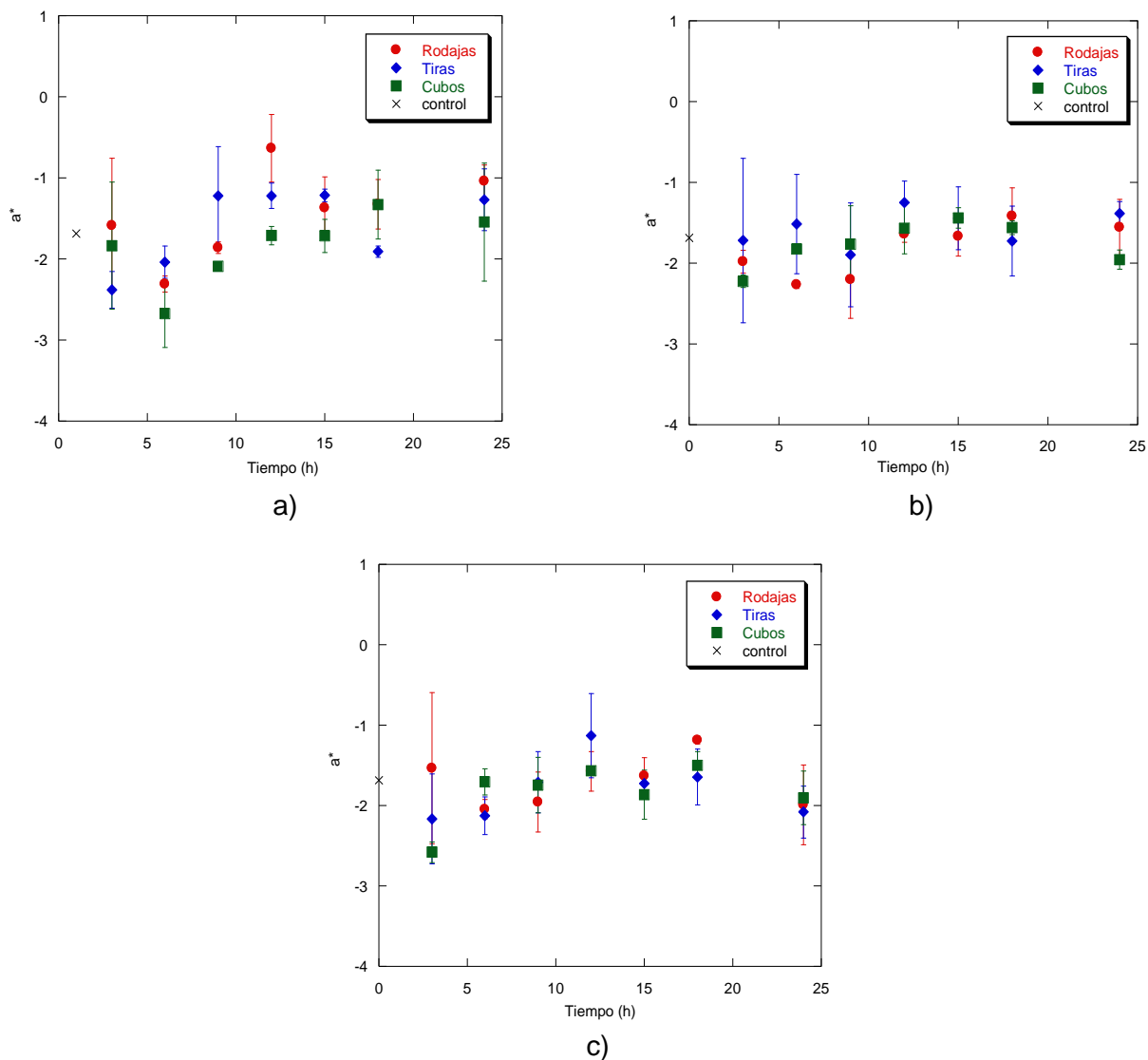


Figura 3.8 Evolución del color del chayote (parámetro a^*) durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, b) $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y c) $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De acuerdo al análisis estadístico con prueba Dunnett ($\alpha=0.05$) en la Figura 3.7 se observó que no hubo diferencias estadísticamente significativas del parámetro a^* en las muestras de chayote liofilizadas durante todo el proceso a la presión de 0.05 mbar. En la Figura 3.8c se observó que en el experimento 18 (cubos a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.1 mbar) el parámetro a^* disminuyó significativamente en las 3 primeras horas del proceso; sin embargo, después de las 3 h de procesamiento el parámetro de color se estabilizó alcanzando valores similares al estándar.

El comportamiento que presentó el chayote durante el proceso con respecto a la disminución del parámetro a^* puede atribuirse a la descomposición de la clorofila y otros pigmentos, así como a las reacciones no enzimáticas (Guiné y Barroca, 2012).

El mejor comportamiento del parámetro a^* con respecto al producto fresco se observó en el chayote en forma de rodaja a las 15 h de proceso, a -40, -60 y -80 °C y presión de 0.05 y 0.1 mbar.

A la temperatura de ultracongelación de -40 y -60 °C y las dos presiones de vacío empleadas durante el proceso, la forma de chayote en cubos proporcionó valores del parámetro a^* similares al valor estándar a partir de las 9 h del proceso, a -80 °C y ambas presiones igualmente los cubos alcanzaron valores similares al estándar de -1.6850 pero entre las 9 y 12 h del proceso. Con respecto a la forma de chayote en rodajas y tiras a las diferentes condiciones empleadas durante su procesamiento se pudo observar que estas dos formas fueron las que más se alejaron del valor inicial del parámetro a^* , sin embargo la diferencia no fue significativa.

3.2.3.3 Cinéticas de evolución del parámetro de color b^*

Los resultados del parámetro b^* obtenidos experimentalmente con sus respectivas condiciones de proceso, son representados en las Figuras 3.9 y 3.10. El análisis estadístico con prueba de Dunnett ($\alpha=0.05$) indicó que con el tiempo de proceso entre 9 y 15 h, el chayote en sus tres tipos de corte y ambas presiones de liofilización mantuvo al parámetro en valores similares a los presentados en el estándar (Tabla 3.1). Un comportamiento similar fue observado por Yurdugül (2008) durante el proceso de evaluación de la retención de las características de calidad en fresas frescas y liofilizadas quien observó que los valores de b^* no fueron afectados significativamente por el uso de bajas temperaturas (-80 °C). De igual manera Muñoz-López (2014) durante el proceso de liofilización de ciruela a 0.05 y 0.1 mbar

observó que el parámetro b^* no presentó diferencias estadísticamente significativas con respecto a la ciruela fresca. Sin embargo, el efecto de las condiciones del proceso de liofilización de chayote sobre el parámetro b^* es contradictorio a lo reportado por Hammami y René (1997) durante la determinación de las variables del proceso de liofilización de fresas quienes observaron un incremento significativo en el parámetro b^* , ellos atribuyen este comportamiento a las reacciones de oscurecimiento de azúcar (caramelización).

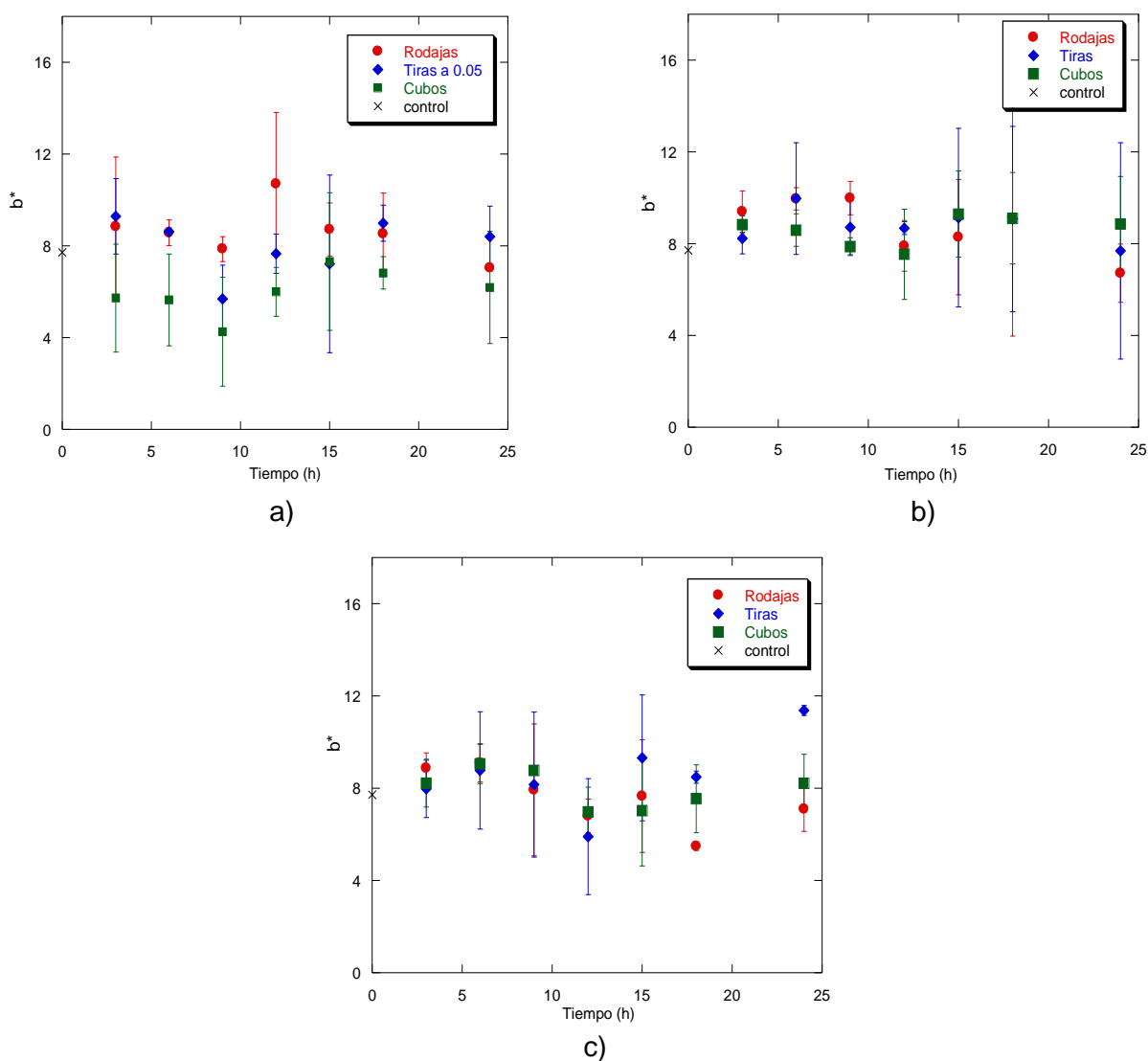


Figura 3.9 Evolución del color del chayote (parámetro b^*) durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar: a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C.

Por otra parte, en la Figura 3.10b se observó un incremento significativo en el parámetro de color b^* durante las primeras 6 h de liofilización del chayote en forma de rodaja a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.1 mbar, logrando estabilidad en las horas posteriores del proceso, mientras que en el chayote en forma de tiras y cubos no se observó un efecto significativo. El efecto de los factores de estudio durante las primeras horas de proceso de liofilización sobre los parámetros de color puede ser atribuido a la presencia de carotenos en el vegetal (Caparino *et al.*, 2012).

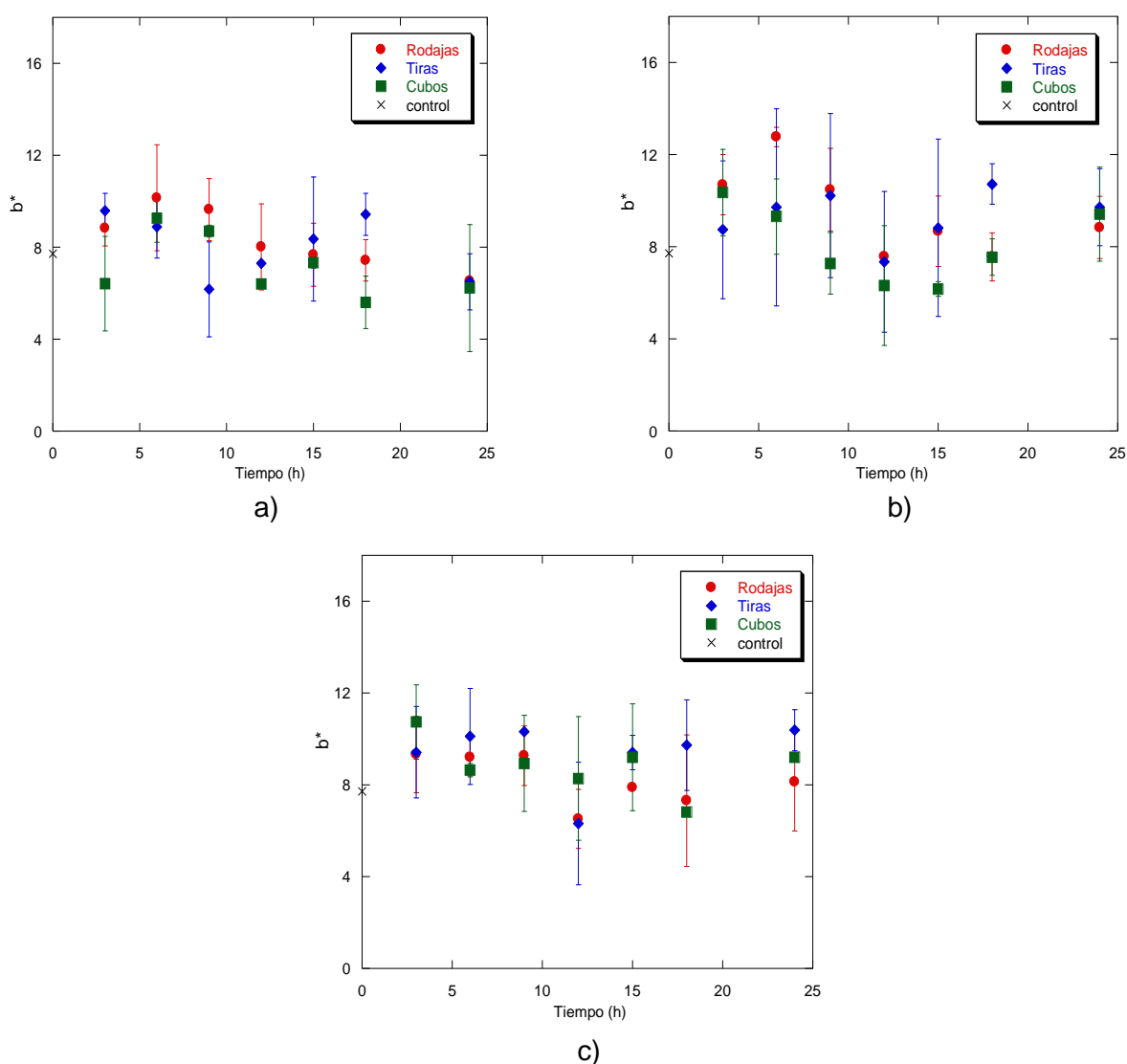


Figura 3.10 Evolución del color del chayote (parámetro b^*) durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar: a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, b) $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y c) $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Resultados similares fueron reportados por Ergün *et al.* (2016) quienes ultracongelaron muestras de kiwi por 2 h a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y liofilizaron a una presión de vacío de 0.1313 mbar, condiciones muy similares a las de este estudio y al igual que en el chayote a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ los autores encontraron que el kiwi presentó un incremento en los parámetros de color L^* y b^* .

3.2.3.4 Cinéticas de evolución del parámetro de color ΔE

Para cada una de las corridas experimentales se evaluó la diferencia de color total (ΔE) de las muestras liofilizadas, con respecto al color del chayote fresco. En los experimentos estudiados la diferencia de color se deriva de los parámetros de color L^* , a^* y b^* e indica la variación total de color. Las Figuras 3.11 y 3.12 muestran la evolución de ΔE durante el proceso de liofilización.

En la Figura 3.11 se muestran los resultados de la diferencia de color de las muestras de chayote liofilizado a las tres temperaturas y 0.05 mbar de presión en sus tres diferentes tipos de formas. De acuerdo con los resultados, el experimento 7 (chayote en forma de rodajas a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.05 mbar) presentó la menor diferencia de color durante las primeras 3 h de proceso.

En la Figura 3.12 se muestran los datos de la diferencia de color (ΔE) de las muestras liofilizadas a las diferentes temperaturas y 0.1 mbar de presión para las tres formas de corte de chayote.

De acuerdo con los resultados, la menor diferencia de color se observó en las muestras de chayote en forma de tiras. Mientras que a temperatura de ultracongelación de -40 y $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, el chayote en forma de cubos, presentó la mayor diferencia de color. Por otra parte, la mayor ΔE se observó en los experimentos 5, 6, 10, 13 y 17.

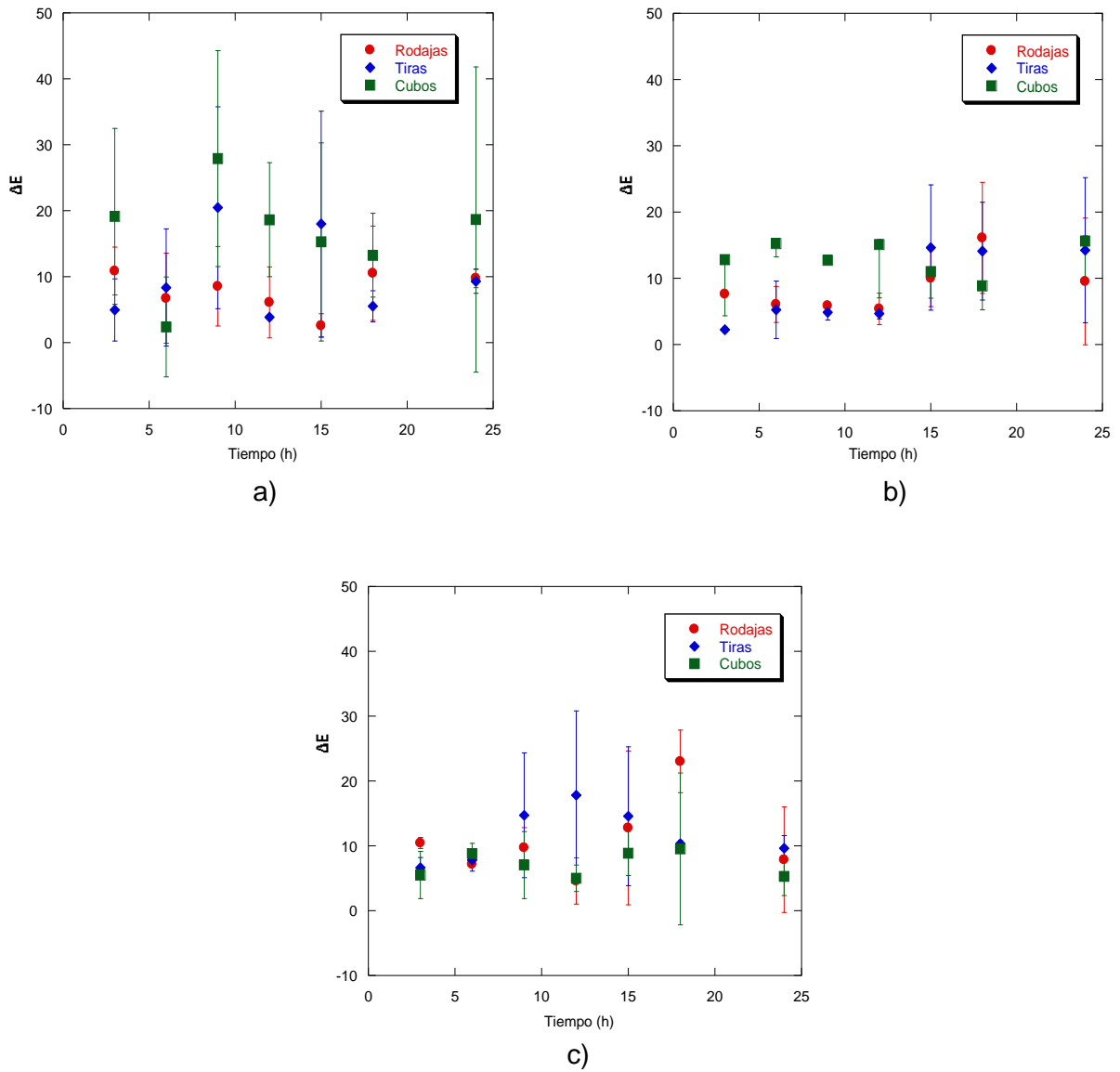


Figura 3.11 Evolución del parámetro ΔE durante el proceso de liofilización a 0.05 mbar:

a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C.

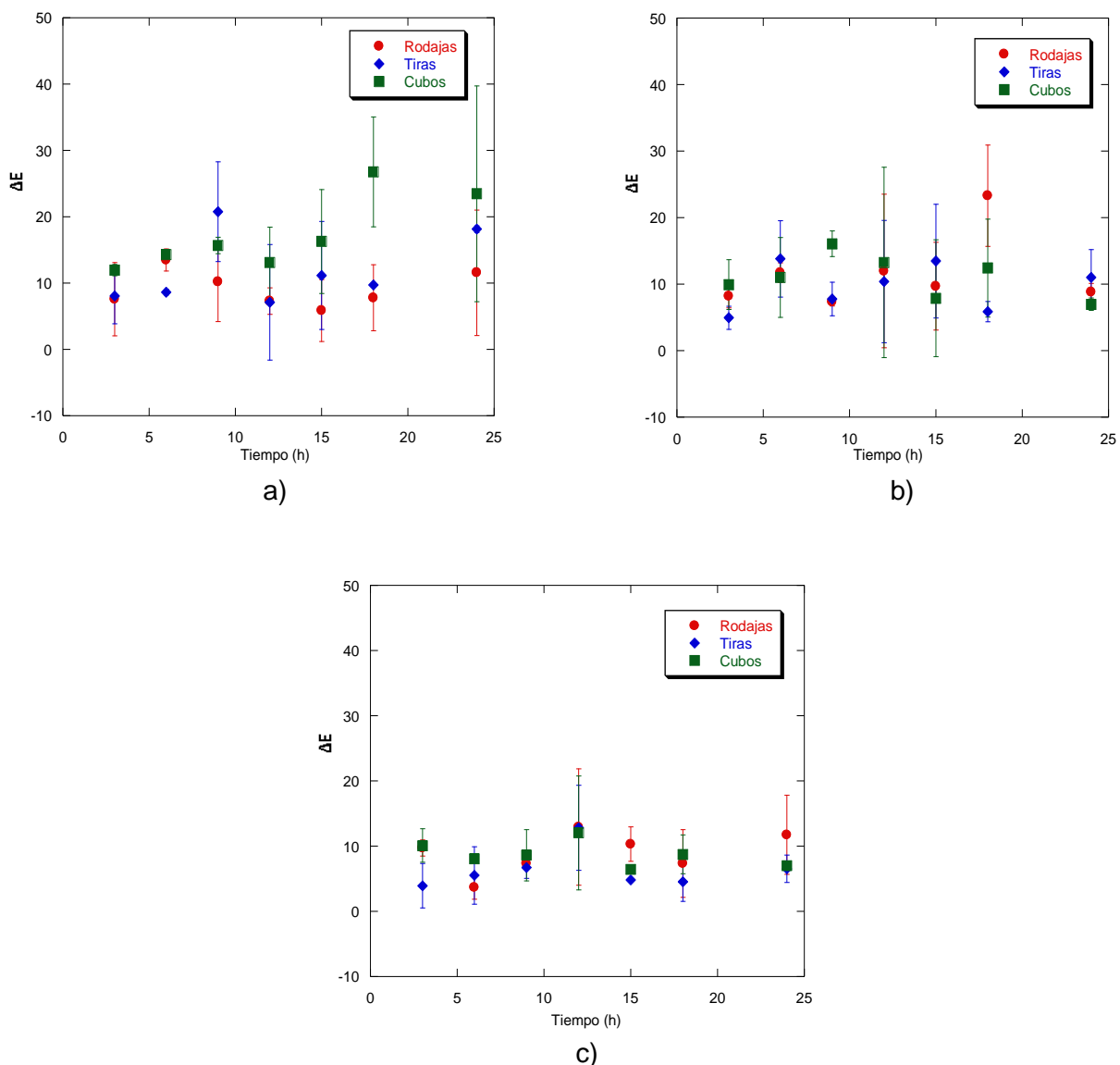


Figura 3.12 Evolución del parámetro ΔE durante el proceso de liofilización a 0.1 mbar:
a) -40 °C, b) -60°C y c) -80 °C.

La diferencia total de color es un parámetro ampliamente empleado para evaluar la variación de color entre la muestra fresca y la muestra deshidratada (Argyropoulos *et al.*, 2011; Villegas-Santiago *et al.*, 2011). Valores mayores de ΔE denotan un mayor cambio de color respecto al material de referencia, mientras que valores bajos de ΔE son considerados aceptables en los procesos de secado (Lozano-Acevedo *et al.*, 2011).

Con respecto a los procesos de liofilización, Guiné y Barroca (2012) reportaron al final del proceso de liofilización de 38 h diferencias de color de $\Delta E = 7.760$ y 12.462 para el pimiento verde y la calabaza respectivamente, mientras que Hawlader *et al.* (2006) al final del proceso de liofilización de 24 h encontraron $\Delta E > 5$ para la guayaba y > 30 para la papaya, ellos atribuyeron esta última diferencia de color al aumento significativo de L^* lo cual no favoreció al fruto liofilizado ya que tomó una coloración más ligera siendo la papaya un fruto oscuro.

3.2.3.5 Color del chayote al final del proceso de liofilización

Cuando se utilizan técnicas de medición de color visuales, los objetos pueden ser descritos como que tienen el mismo color cuando no muestran ninguna diferencia observable en el color bajo idénticas condiciones de iluminación. Dichas técnicas implican observar el color de una muestra comparándola con estándares de color definidos en idénticas condiciones de iluminación (Figura y Teixeira, 2007). Por lo anterior, las muestras de chayote liofilizado fueron comparadas con el estándar considerado como el color del chayote fresco.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores obtenidos de los parámetros de color (L^* , a^* , b^* y ΔE) al final del proceso de liofilización. Como se puede observar a partir de los resultados, el parámetro a^* presentó un aumento al final del proceso de 24 h de liofilización, por tal motivo se observó una disminución en la coloración verde del chayote. Esta última observación es congruente con lo reportado por Guiné y Barroca (2012) quienes obtuvieron una disminución del parámetro a^* del pimiento verde liofilizado, ellos atribuyen la disminución del parámetro a^* a la descomposición de la clorofila presente en el alimento. Un comportamiento contrario fue observado por Ergün *et al.* (2016) quienes reportaron una disminución del parámetro a^* al final del proceso de liofilización de kiwi a 13.33 Pa indicando con esta disminución, un incremento en la tonalidad verde del kiwi liofilizado.

Una desventaja de los procesos convencionales de secado es la degradación de carotinoides y clorofila durante el proceso, Naidu *et al.* (2012) en su investigación de secado de Fenogreco (*Trigonella foenum graecum*) por aire caliente, radiofrecuencia y aire de baja humedad, encontraron que estos procesos de secado degradan carotenoides presentes en los vegetales por el mecanismo de oxidación por radicales libres, así mismo observaron que el calor afecta la retención de la clorofila en el vegetal, degradando su coloración verde característica. Por otra parte Buchailot *et al.* (2009) en su estudio de secado de mirto limón (*Backhousia citriodora*) por lecho fluidizado mencionan que la clorofila puede ser degradada por fotodegradación cuando la luz y el oxígeno están presentes y durante el calentamiento de las muestras debido a las altas temperaturas.

Tabla 3. 4 Color del chayote al final del proceso de liofilización.

Experimento	T _{uc} (°C)	F _m	P _{lio} (mbar)	L*	a*	b*	ΔE
1	-40	Rodajas	0.05	36.910 ^{1.329}	-1.3600 ^{0.0141}	7.050 ^{0.141}	9.745 ^{1.421}
2	-40	Tiras	0.05	38.035 ^{2.581}	-1.3000 ^{0.2121}	8.410 ^{1.329}	9.315 ^{1.831}
3	-40	Cubos	0.05	30.290 ^{20.039}	-1.0600 ^{0.4243}	6.190 ^{2.447}	18.675 ^{23.144}
4	-40	Rodajas	0.1	40.085 ^{15.266}	-1.0400 ^{0.1980}	6.540 ^{0.127}	11.560 ^{9.461}
5	-40	Tiras	0.1	29.485 ^{0.304}	-1.2700 ^{0.3818}	6.495 ^{1.223}	18.130 ^{0.481}
6	-40	Cubos	0.1	25.705 ^{13.485}	-1.5450 ^{0.7283}	6.225 ^{2.765}	23.480 ^{16.263}
7	-60	Rodajas	0.05	37.340 ^{9.009}	-1.3950 ^{0.0495}	6.720 ^{1.273}	9.540 ^{9.574}
8	-60	Tiras	0.05	36.250 ^{14.114}	-1.1750 ^{0.3748}	7.690 ^{4.709}	14.260 ^{10.946}
9	-60	Cubos	0.05	32.875 ^{6.880}	-1.8250 ^{0.5445}	8.860 ^{2.079}	15.635 ^{6.145}
10	-60	Rodajas	0.1	38.850 ^{2.404}	-1.5550 ^{0.3465}	8.835 ^{1.351}	8.805 ^{1.294}
11	-60	Tiras	0.1	38.045 ^{6.244}	-1.3850 ^{0.1485}	9.720 ^{1.669}	11.005 ^{4.193}
12	-60	Cubos	0.1	44.035 ^{6.894}	-1.9550 ^{0.1202}	9.415 ^{2.044}	6.970 ^{0.919}
13	-80	Rodajas	0.05	40.315 ^{9.511}	-1.3500 ^{1.0182}	7.105 ^{0.969}	7.885 ^{8.139}
14	-80	Tiras	0.05	53.955 ^{2.737}	-1.7950 ^{1.3789}	11.380 ^{0.212}	9.640 ^{1.966}
15	-80	Cubos	0.05	42.505 ^{4.787}	-1.5300 ^{0.0283}	8.220 ^{1.259}	5.315 ^{2.963}
16	-80	Rodajas	0.1	36.075 ^{6.852}	-1.9900 ^{0.4950}	8.140 ^{2.150}	11.730 ^{6.067}
17	-80	Tiras	0.1	50.915 ^{1.732}	-2.0800 ^{0.3253}	10.385 ^{0.898}	6.525 ^{2.086}
18	-80	Cubos	0.1	40.750 ^{0.778}	-1.9050 ^{0.3323}	9.205 ^{0.035}	7.020 ^{0.707}

Los análisis estadísticos (Apéndice C, D, E y F) con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) aplicados a los resultados finales de los parámetros de color (L^* , a^* , b^* y ΔE) durante el proceso de liofilización indicaron que no hubo efecto significativo de las variables estudiadas dentro del proceso (tipo de corte, temperatura de ultracongelación y presión en el liofilizador) es decir, no existe diferencia estadísticamente significativa con respecto a la muestra fresca del chayote.

En la Figura 3.13 se presentan las muestras de chayote liofilizadas en sus tres formas: rodajas, cubos y tiras al final del proceso de liofilización de 24 h, se puede apreciar que el chayote en la forma de cubos presentó un ligero colapso, Barreto (1996) menciona que el encogimiento de los alimentos que fueron sometidos a un proceso de liofilización es debido en algunas ocasiones a que durante el proceso de congelación no toda el agua presente en el alimento solidifica, algunas veces por haber sido sometido a una congelación rápida que causa que parte del agua quede en estado incompleto de cristalización; el agua no cristalizada es removida del alimento por difusión pero no puede llamarse ya sublimación y esta remoción de agua es conocida como secado secundario que es el que produce la reducción de volumen del producto.

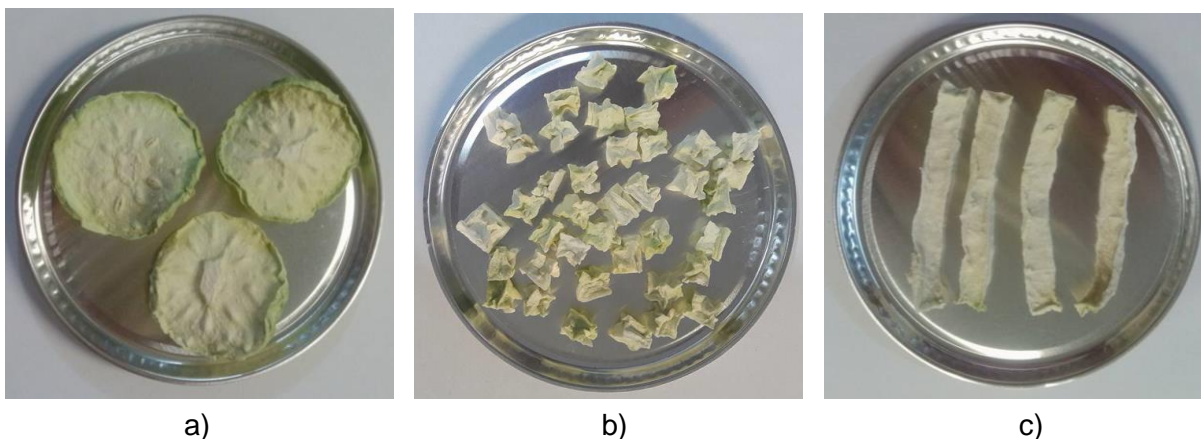


Figura 3.13 Muestras de chayote al final del proceso de liofilización en sus tres formas: a) rodajas, b) cubos y c) tiras.

Cuando el colapso no es visualmente obvio puede ser evaluado a través de la rehidratación del producto, se sabe que el colapso estructural disminuye la capacidad de rehidratación (Marques *et al.*, 2009).

Colapso y contracción son términos usados para describir la pérdida de estructura. Un producto colapsado puede mostrar reducción del tamaño de poro y contracción volumétrica (Khalloufi *et al.*, 2010; Madiouli *et al.*, 2012).

3.2.4 Rehidratación del chayote (*Sechium edule*)

Los estudios de rehidratación han sido considerados como una medida de conocer el daño en el material durante el secado (Marques *et al.*, 2009).

Según Ergün *et al.* (2016) en su estudio de rehidratación de kiwi liofilizado, los productos liofilizados presentan mayor calidad que los productos deshidratados por métodos convencionales, principalmente porque pueden ser reconstruidos con agua rápidamente tomando una similitud con el alimento original.

Las cinéticas de rehidratación de las muestras de chayote a temperaturas de 20, 40, 60 y 80 °C se muestran en la Figura 3.14. Las muestras que fueron seleccionadas para su rehidratación fueron los cortes de chayote en forma de cubos ultracongelados a -60 °C a 0.1 mbar de presión debido a que a estas condiciones, se lograron obtener niveles de humedad y actividad de agua menores a 5% y 0.4 respectivamente. Por otra parte, el chayote en forma de tira también podría ser sometido al proceso de rehidratación, ya que en esta forma se lograron igualmente valores de actividad de agua y humedad aceptables en un periodo de tiempo corto sin embargo, los cubos representan una alternativa para su uso comercial como aditivo en sopas instantáneas o complemento de productos alimenticios debido a su tamaño.

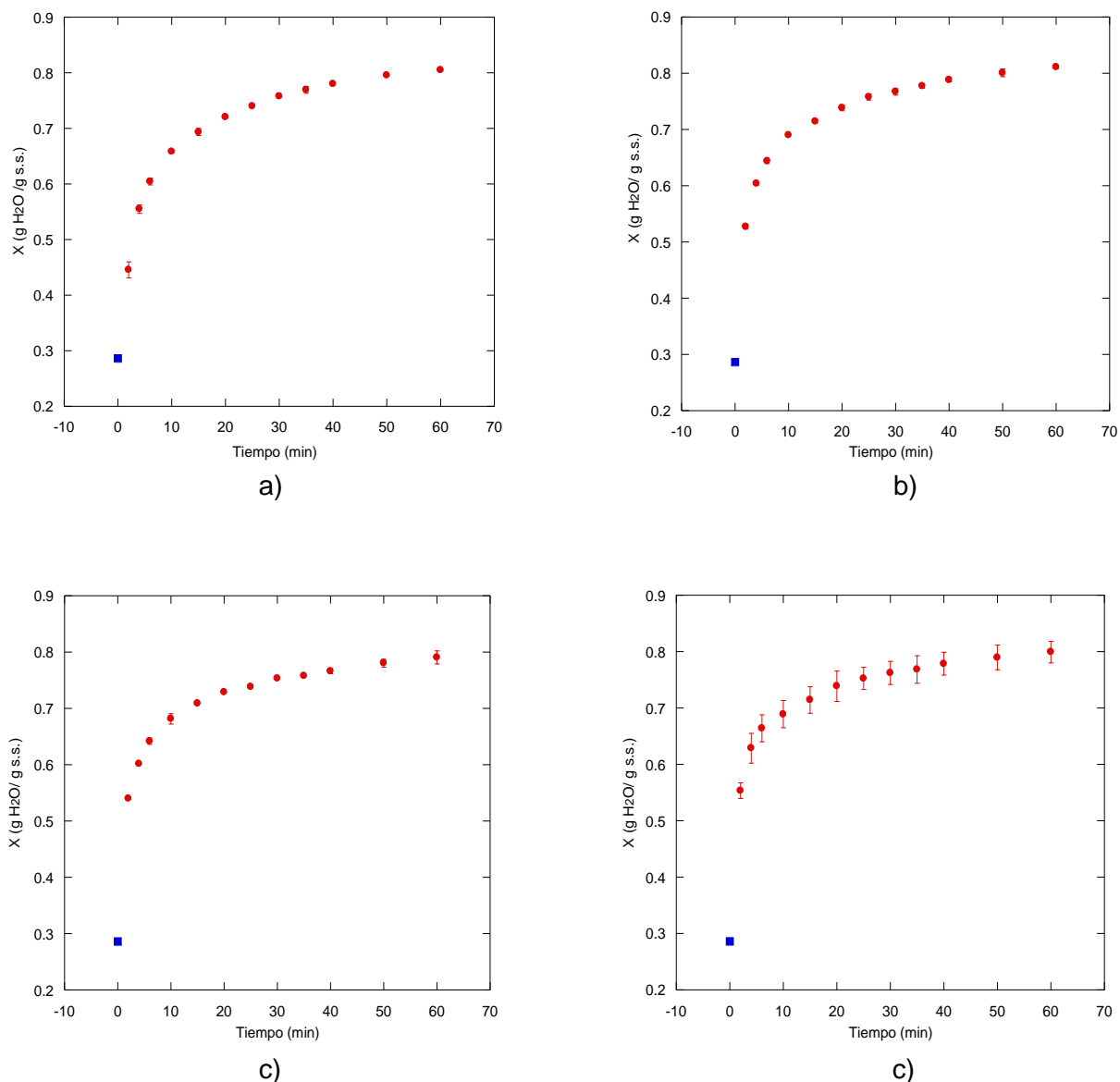


Figura 3.14 Muestras de chayote rehidratadas con agua a diferentes temperaturas: a) 20 °C, b) 40 °C, c) 60 °C y d) 80 °C.

Se pudo observar un comportamiento similar en las curvas de rehidratación de las muestras de chayote para las 4 temperaturas del agua de rehidratación, Arriola-Guevara *et al.* (2006) confirmaron que a tiempos de congelación menores a 10 h las cinéticas de rehidratación de aguacate hass son muy similares e independientes de la temperatura del medio, mientras que para tiempos de congelación mayores se observa una diferencia importante; esto se debe a que cuando el producto es

congelado por largos periodos de tiempo los poros formados son grandes, lo que causa que se debilite la estructura (Ruiz-Gómez *et al.*, 2004); durante el proceso se observó que a la temperatura más baja de 20 °C (Figura 3.14a) la rehidratación en los primeros 20 minutos presentó una ligera lentitud en comparación con las otras tres temperaturas, sin embargo esto no influyó en la capacidad de rehidratación final del chayote. Al final del proceso de rehidratación las muestras de chayote mostraron una apariencia visualmente agradable.

En la Figura 3.15b se presentan las muestras de chayote en forma de cubos rehidratadas al final del proceso de rehidratación por 60 minutos.



Figura 3.15 Muestras de chayote a) liofilizadas y b) rehidratadas.

Muñoz-López (2014) reportó que al tener capacidades de rehidratación superiores al 70% un alimento liofilizado no presenta daño estructural, en el presente estudio se obtuvieron capacidades de rehidratación de las muestras de chayote entre el 79 y 81%, con esto se confirma que el chayote liofilizado a las diferentes condiciones utilizadas durante el proceso no presentó daño estructural pronunciado.

Al final del proceso de rehidratación de 60 minutos las muestras rehidratadas con agua a las 4 temperaturas no presentaron diferencias estadísticamente significativas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se caracterizó fisicoquímicamente el chayote determinando el contenido humedad, cenizas, proteínas, humedad, actividad de agua y color del chayote, los resultados obtenidos fueron similares a los reportados en bibliografía.

De acuerdo a pruebas preliminares se establecieron las condiciones de procesamiento (ultracongelación y liofilización) de chayote por un periodo de 24 h y se obtuvieron las curvas de las propiedades fisicoquímicas (humedad, actividad de agua, y parámetros de color L^* , a^* , b^* y diferencia de color).

Se evaluó el efecto de la temperatura de ultracongelación sobre las características fisicoquímicas del chayote liofilizado y se observó que las condiciones de presión y temperatura reducidas (-60, -80 °C y 0.05, 0.1 mbar) proporcionaron la menor X , a_w y ΔE en los 3 tipos de forma del chayote.

Se logró reducir el contenido de a_w y X alcanzando valores de a_w menores a 0.6 después de las 12 h del proceso y menores al 10% en el caso de la X después de las 15 h del proceso en las diferentes condiciones evaluadas. Los valores de a_w y X obtenidos a estas condiciones del proceso se asegura la inhibición de crecimiento microbiano (hongos, levaduras y mohos) en las muestras liofilizadas y se prolonga el tiempo de vida útil debido al bajo contenido de agua total presente en el alimento deshidratado.

El color fue afectado por la temperatura de ultracongelación de -40 °C pero no se afectó de forma significativa, ya que los 18 experimentos presentaron valores de los parámetros de color similares al valor estándar.

El parámetro de color L^* aumentó significativamente a la temperatura de ultracongelación de -40 °C y presión de 0.05 mbar, en contraste en la temperatura de

ultracongelación más baja de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.1 mbar de presión, el parámetro se estabilizó obteniendo valores similares al estándar en todas las formas de chayote; finalmente las condiciones de presión, forma de las muestras y temperaturas de ultracongelación no tuvieron efecto estadísticamente significativo sobre los parámetros de color a^* y b^* .

Al final del proceso de liofilización se obtuvo un producto de chayote con calidad visual y microbiológicamente estable, esto se relaciona con las condiciones reducidas utilizadas durante el proceso.

Respecto al proceso de rehidratación, al final del proceso de 60 minutos las muestras de chayote presentaron una capacidad de rehidratación entre el 79-81%, lo cual confirmó que durante el proceso de liofilización el chayote no sufrió daño estructural evidente.

Para futuras investigaciones es recomendable realizar una evaluación sensorial para conocer la aceptación del producto por parte del consumidor, así mismo pruebas de almacenamiento a diferentes condiciones y evaluación del tiempo de vida de anaquel del chayote liofilizado.

Se recomienda optimizar el proceso para encontrar las mejores condiciones del proceso de ultracongelación y liofilización del chayote.

Finalmente se recomienda evaluar la aplicación del chayote liofilizado a escala industrial como aditivo de pastas, botanas o suplementos alimenticios.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acerate, A. 1950. Frutas y verduras congeladas. Consejo superior de investigaciones científicas Zaragoza. Gómez, Estación Experimental de Aula Dei.

Aguilera, J.M., y D.W. Stanley. 1999. Microestructural principles of food processing and engineering. Maryland, Aspen Publisher, Inc.

Argyropoulos, D., M. Tahir K. y J. Müller. 2011. Effect of air temperature and pre-treatment on color changes and texture of dried *Boletus edulis mushrooms*. Dry. Technol. 29:1890-1900.

Alvarenga-Venutolo, S., A. Abdelnour-Esquivel, y V. Villalobos-Aránbula. 2007. Conservación in vitro de chayote (*Sechium edule*). Agronomía Mesoamericana. 18:165-73.

Arias-Gómez, Z., J.A. Barajas-Gamboa, y G.A. Hincapié-Llanos. 2013. Evaluación del aguacate variedad Hass (*Persea americana Mill*) deshidratado por liofilización. Ingeniar UPB 2013. Universidad Pontificia Bolivariana.

Arriola-Guevara, E., T. García-Herrera, G.M. Guatemala-Morales, J. Nungaray-Arellano, O. González-Reynoso y J.C. Ruíz-Gómez. 2006. Comportamiento del aguacate Hass liofilizado durante la operación de rehidratación. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 5(1):51-56.

Avendaño-Arrazate, C.H., J. Cadena-Iñiguez, M. Arévalo-Galaraza, E. Campos-Rojas, V.M. Cisneros-Solano y J.F. Aguirre-Medina. 2010. Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México A.C. México.

Bachailot A., N. Caffin y B.Bhandari. 2009. Drying of lemon myrtle (*backhousia citriodora*) leaves: retention of volatiles and color. *Dry Technol.* 27:445-450.

Badui, S. 2006. Química de los alimentos. PEARSON EDUCACIÓN, México.

Barbosa-Cánovas, G. and A. Ibarz. 2003. Unit Operations in Food Engineering. CRC Presss.USA.

Barbosa-Cánovas, G. and H. Vega-Mercado. 1996. Dehydration of foods. International Thomson Publishing, USA.

Barreto, H. F. 1996. Liofilización un método de secado para alimentos. IICA, Costa Rica.

Barreiro, M.J.A. y B.A.J. Sandoval. 2006. Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Equinoccio, Caracas, Venezuela.

Bello-Gutiérrez, J. 2000. Ciencia bromatológica: Principios generales de los alimentos. Díaz de Santos S. A. España.

Bello-Luna, L. 2012. Evaluación energética durante el proceso de secado por aspersión de café instantáneo. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Bradley, R. L. 2010. Moisture and total solids analysis. Springer Science + Business Media, Inc. New York.

Cadena-Iñiguez, J. y M.L.C. Arévalo-Galarza. 2010. Rescatando y aprovechando los recursos fitogenéticos de Mesoamérica. Vol 1. El Chayote. GISem. México.

Cadena-Iniguez, J., C.H. Avendaño-Arzate, M. Soto-Hernández, L.M. Ruíz-Posadas, J.F. Aguirre-Medina y L. Arévalo-Galarza. 2008. Intraspecific variation of *Sechium edule* (Jacq.) Sw. in the state of Veracruz, México. Genetic Resources and Crop Evolution. 55:835-847.

Caparino, O.A., J. Tang, C.I. Nindo, S.S. Sablani, J.R. Powers y J.K. Fellman. 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. Journal of Food Engineering 111(1):135–148.

Castillo-Reyes, J.A. 2008. Efecto de la concentración, tamaño de partícula y temperatura en las propiedades reológicas de suspensiones de chayote (*Sechium edule*). Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Ceballos, O.E.M. y M.M.T. Jiménez. 2012. Cambios en las propiedades de frutas y verduras durante la deshidratación con aire caliente y su susceptibilidad al deterioro microbiano. Temas selectos de Ingeniería de Alimentos 6(1):98-110.

COVECA. 2010. Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria. <http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/docs/PAGE/COVECAINICIO/IMAGENES/ARCHIVOSPDF/ARCHIVOSDIFUSION/CHAYOTE2010>. (Consultada septiembre, 2015).

Delmoro, J., D. Muñoz, V. Nadal, A. Clementz y V. Pranzetti. 2010. El color en los alimentos: determinación de color en mieles. Invenio. 13 (25): 145-152

Domínguez-Niño, A. 2014. Proceso de secado por aspersion de suero de leche. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Domínguez-Niño, A., A.N. Buendía-González, D. Cantú-Lozano, I. Andrade-González y G. Luna-Solano. 2016. Efecto del secado por lecho fluidizado sobre las

propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del queso fresco Mexicano. Revista Mexicana de ingeniería química. 15(3): 869-881.

Doymaz, I. 2007. Air-Drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering. 78(4):1291-1297.

Engels J.M.M. 1983. Variation in *Sechium edule* in Central America. J Am Soc Horticult Sci. 108(5):706–707.

Ergün, K., G. Çalıskan, y S. Dirim. 2016. Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (*Actinidia deliciosa*) slices. Heat and Mass Transfer 2016: 52(12):3, 2697-2705.

Eroski Consumer. 2016. <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/ciencia-y-tecnologia/2008/03/26/175613.php>. (Consultada enero, 2016).

Figura, L.O. y A.A. Teixeira. 2007. Food physics: physical properties-measurement and applications. Springer-Verlag. Berlin Hidelberg.

Fundación Produce, Sinaloa A.C. Enlace innovación y progreso. 2011. <http://www.fps.org.mx/portal/index.php/notas/1009-el-chayote-atractiva-fuente-de-divisas-para-sinaloa> (Consultada enero, 2016).

Gamboa, W. 2005. Producción agroecológica, una opción para el desarrollo del chayote [*Sechium edule*(Jacq.) Sw.]. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Geankoplis, C.J. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias. CECSA. México, DF.

Gordon, E.A., L.J. Guppy y M. Nelson. 2000. The antihypertensive effects of the Jamaican Cho-Cho (*Sechium edule*). *West Indian Medical Journal*, 49(1): 27-31.

Guiné R. P. F. y M.J. Barroca. 2012. Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food and Bioproducts Processing*, 90(1): 58-63.

Hammami, C., y F. René. 1997. Determination of freeze-drying process variables for strawberries. *Journal of Food Engineering*. 32(2):133-154.

Hawlder, M., C. Perera, M. Tian y K. Yeo. 2006. Drying of Guava and Papaya: Impact of Different Drying Methods. *Drying Technol.* 24(1):77-87.

Herrera, C., N. Bolaños y G. Lutz. 2003. Química de los alimentos: manual del laboratorio. Universidad de Costa Rica.

Kasper, J.C., G. Winter y W. Friess. 2013. Recent advances and further challenges in lyophilization. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 85(2):162–169.

Khalloufi, S., C. Almeida y P. Bongers. 2010. A fundamental approach and its experimental validation to simulate density as a function of moisture content during drying processes. *J Food Eng.* 97(2):177-187.

Konica Minolta. <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>. (Consultada noviembre, 2015).

Lars P. J. y A.R. Lai. 1986. Chayote (*Sechium edule*) causing hypokalemia in pregnancy. *Am J Obstet Gynecol.* 155(5):1048-9.

León, J. 2000. Reseña de la tercera edición del libro de Jorge León Botánica de los cultivos tropicales. IICA, San José, Costa Rica.

Lira, R. 1996. Chayote. *Sechium edule* (Jacq.) Sw. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute. Rome, Italy.

Lira, R. 1998. Diversidad e importancia de la familia *Cucurbitaceae* en México. *Acta Botánica Mexicana* 42:43-77.

Lira, R. 2001. *Cucurbitaceae*. Flora del bajío y Regiones adyacentes. Fascículo 92. Universidad Nacional Autónoma de México.

Lozano-Acevedo, A., M. Jiménez-Fernández, A. Ragazzo-Sánchez, G.R. Urrea-García, y G. Luna-Solano. 2011. Fluidized bed drying of thinly sliced potato (*Solanum tuberosum*). *American Journal of Potato Research* 88(4): 360- 366.

Marques, L.G., M.C. Ferreira y J.T. Freire. 2007. Freeze-drying of acerola (*Malpighia glabra* L.). *Chemical Engineering and Processing* 46(5):451–457.

Madiouli, J., J. Sghaier, D. Lecomte, and H. Sammouda. 2012. Determination of porosity change from shrinkage curves during drying of food material. *Food Bioproducts Process.* 90(1):43-51.

Marques, L. G. y J.T. Freire. 2005. Analysis of Freeze-Drying of Tropical Fruits. *Drying Technology: An International Journal*, 23(9-11): 2169-2184.

Marques, L., M. Prado y J. Freire. 2009. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT Food Sci. Technol.* 42 (7):1232-1237.

Mayer, L.E., S.M. Bertoluzzo, y M.G. Bertoluzzo, 2006. Conservación de alimentos diseño y construcción de un liofilizador. *Invenio*, 9(17):147-157.

Mazza G. 1983. Dehydration of carrots. Effect of pre-drying treatments on moisture transport and product quality. *J Food Technol* 18:113-123.

Millán, R., V. Félix y R. Tapia. 2001. "Modelado matemático de isothermas de absorción de humedad en los alimentos usando redes neuronales artificiales". *Interciencia, Asociación Interciencia*. Caracas, Venezuela. 26(5):190-194.

Montgomery, D.C. 2012. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Iberoamerica, México.

Monroy-Vázquez, M.E., M. Soto-Hernández, J. Cadena-Iniguez, E. Santiago-Osorio, L.M. Ruíz-Posadas y H. Rosas-Acevedo. 2009. Estudio biodirigido de un extracto alcohólico de frutos de *Sechium edule* (Jacq.) Swartz. *Agrociencia* 43(8):777-790.

Morton, F. J. 1981. The chayote, a perennial, climbing, subtropical vegetable. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 94:240-245.

Mujumdar, A.S. y A.S. Menon. 1995. Drying of solids: principles, classifications and selection of dryers. In: Handbook of Industrial Drying (edited by A.S. Mujumdar). New York, NY: Marcel Dekker.

Muñoz-López, C. 2014. Proceso de secado por charolas y liofilización de ciruela mexicana (*spondias purpurea l.*) Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Naidu, N.N., H. Khahum, G. Sulochanamma, H.B. Sowbhagya, U.H. Hebbbar, M. Prakash y P. Srinivas. 2012. Effect of drying methods on the quality characteristics of fenugreek (*Trigonella foenumgraecum*) greens. *Drying Technology*. 30(8):808-816.

Nee, M. 1993. Cucurbitaceae. Flora de Veracruz. Fascículo 74. Sosa V. (Ed en Jefe). Instituto de Ecología A.C. y Universidad de California-Riverside. México.

Neumann HJ. 1972. Dehydrated celery: Effects of predrying treatments and rehydration procedures on reconstitution. *J Food Sci* 37:437-441.

Núñez-Galindo, Y. 2016. Proceso de secado por aspersion de pulque proveniente de Agave salmiana. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Ocaña, E.R 2013. Obtención de uva liofilizada. Tesis de grado para de Químico de Alimentos. Universidad central del ecuador, facultad de ciencias químicas. Quito: UCE.

Oikonomopoulou V. P. y M. K. Krokida. 2012. Structural Properties of Dried Potatoes, Mushrooms, and Strawberries as a Function of Freeze-Drying Pressure. *Drying Technology: An International Journal*. 30(4): 351-361.

Olguín-Hernández, G., G. Valdovinos-Ponce, J. Cadena-Íñiguez y M.L. Arévalo-Galarza. 2013. Etiología de la Marchitez de Plantas de Chayote (*Sechium edule*) en el Estado de Veracruz. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31(2):161-169.

Ordoñez A.A.L., J.D. Gomez, M.A. Vattuone y M.I. Isla. 2006. Antioxidant activities of *Sechium edule* (Jacq.) Swartz extracts. *Food Chemistry*, 97(3):452–458.

Orrego, A. C. E. 2008. Congelación y Liofilización de Alimentos. Díaz de santos S.A. Manizales, Caldas, Colombia.

Paciulli M., T. Ganino, N. Pellegrini, M. Rinaldi, M. Zaupa, A. Fabbri y E. Chivaro. 2014. Impact of the industrial freezing process on selected vegetables-Part I. Structure, texture and antioxidant capacity. *Food Research International*, 74:329–337.

Parkin, K. L., A. Marangoni, Y. Yada, y D.W. Stanley. 1989. Chilling injury. A review of possible mechanisms. *Journal of Food Biochemistry*. 13(8):127-153.

Parzanese, M. Tecnologías para la Industria Alimentaria. 2015. Liofilización de alimentos. http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_03_Liofilizados.pdf (Consultada Noviembre, 2015).

Singh, P.R. y D.R. Heldman. 1998. Introducción a la ingeniería de los alimentos. Acribia, España.

Pérez-Francisco, J.M., R. Cerecero-Enríquez, I. Andrade-González, J.A. Ragazzo-Sánchez, y G. Luna-Solano. 2008. Optimization of Vegetal Pear Drying Using response Surface Methodology. *Drying Technology*, 26(11):1401-1405.

Quintana-Zaragoza, L., J. Villegas-Santiago, M. Jiménez-Fernández, A. Aguilar Laserre, G. Luna-Solano. 2009. Optimization of mango miniflakes drying using genetic algoritms. Pacific Drying Conference, Bangkok, Thailand, p.p 1234-1239.

Ramírez- Navas, J.S. 2006. Liofilización de alimento. Universidad del valle, Cali Colombia.

Ratti C. 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49(4):311–319.

Reyes-Hernández, E.C. 2012. Estudio del Chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.). Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana. México.

Reyes, A., R. Vega, R. Bustos y C. Araneda. 2008. Effect of Processing Conditions on Drying Kinetics and Particle Microstructure of Carrot. *Drying Technology*. 26(10):1272-1285.

Ruijie, Li., H. Luelue, Z. Min, S.M. Arun y W. Yu Chuan. 2014. Freeze Drying of Apple Slices with and without Application of Microwaves. *Drying Technology: An International Journal*. 32(15):1769-1776.

Ruiz-Gómez, J. C., O. González-Reynoso, J. Nungaray-Arellano, H. Gómez-Hernández y E. Arriola –Guevara. 2004. Effects of freeze Drying Kinetics on Stability and Product Quality of Hass Avocado. *Biotechnology 2004*, 17-22 de October. Santiago, Chile.

Ruiz-López, I.I., I.R. Huerta-Mora, M.A. Vivar-Vera, C.E. Martínez-Sánchez, y E. Herman-Lara. 2010. Effect of osmotic dehydration on air-drying characteristics of chayote. *Drying Technology: An International Journal*, 28(10):1201-1212.

SAGARPA. 2015. www.siacon.sagarpa.gob.mx (Consultada septiembre, 2015).

Santos-Souza, D., L. Gimeno-Marques, E. De Barros-Gomes, y N. Narain. 2015. Lyophilization of Avocado (*Persea americana* Mill.): Effect of Freezing and Lyophilization Pressure on Antioxidant Activity, Texture, and Browning of Pulp. *Drying Technology: An International Journal*, 33(2): 194-204.

SINAREFI. 2015. Sistema Nacional de Recursos Filogenéticos para la alimentación y la agricultura. http://www.sinarefi.org.mx/redes/red_chayote.html (Consultada Octubre, 2015).

SIAP. 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [http://snics.sagarpa.gob.mx/rfaa/Paginas/Hortalizas/Chayote/Usos Produccion Nacional.aspx](http://snics.sagarpa.gob.mx/rfaa/Paginas/Hortalizas/Chayote/Usos_Produccion_Nacional.aspx) (Consultada Octubre, 2015).

Solís-Ruiz, G., E. Bolaños-Reynoso, K. Waliszewski, y G. Luna-Solano. 2008. Effect of osmotic drying on the physicochemical characteristics of pear vegetal (*Sechium edule*). 16th International Drying Symposium (IDS 2008).

Troller, J.A. 2012. Water activity and food. Academic Press, New York, San Francisco.

Vázquez-Vila, M.J., F. Chenlo-Romero, R. Moreira Martínez y P. da Riva López. 2007. Rehidratación de zanahorias previamente secadas con aire y deshidratadas osmóticamente. XI congreso internacional de ingeniería de proyectos Lugo, 26-28 Septiembre.

Villegas-Santiago, J., M. Calderon-Santoyo, A. Ragazzo-Sánchez, M.A. Salgado-Cervantes, y G. Luna-Solano. 2011. Fluidized bed and tray drying of thinly sliced mango (*Mangifera indica*) pretreated with ascorbic and citric acid. International Journal of Food Science & Technology, 46(6):1296–1302.

Welty-Chanes, J. y F. Vergara-Balderas. 1997. Actividad de agua: conceptos y aplicación en alimentos con alto contenido de humedad. En: Temas en tecnología de alimentos. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología (CYTED). Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.

Xotlanihua-Soto, C.E. 2011. Efecto de las condiciones de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de chayote deshidratado (*Sechium edule*). Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Yendi I.M., C. López y M.E. Rosas. 2009. Estudio de la Cinética de Rehidratación de Zanahoria (*Daucus Carota*) Deshidratadas. Información Tecnológica, 20(3):65-72.

Yurdugül, S. 2008. An evaluation of the retention of quality characteristics in fresh and freeze-dried alpine strawberries. Int. J. Food Sci. Technol. 43(5):865-870.

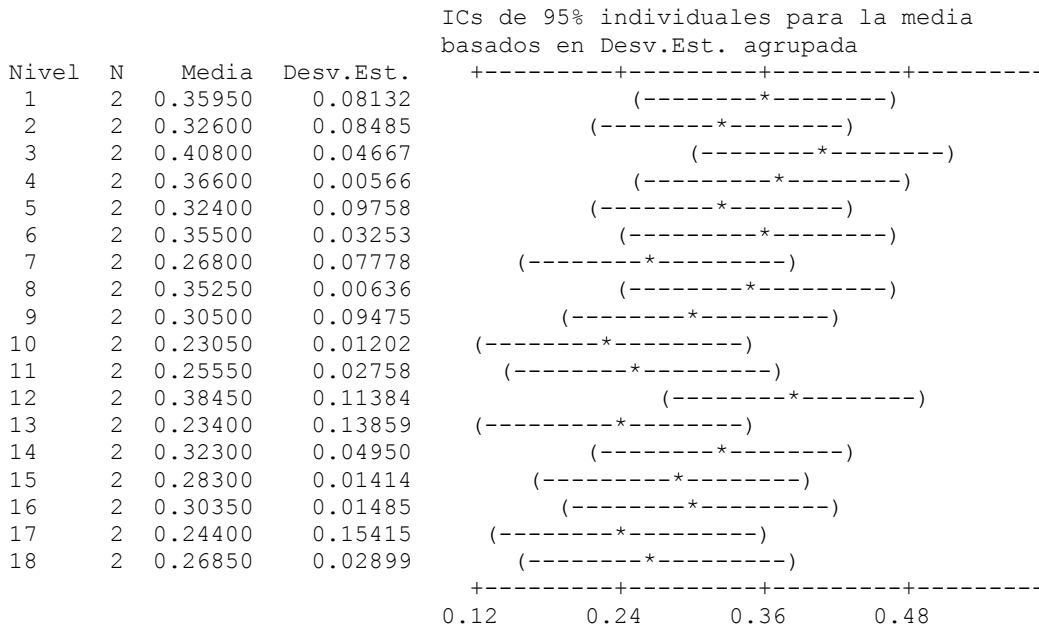
Apéndices

Apéndice A

Análisis estadístico (ANOVA) de a_w al final del proceso de liofilización con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) de los experimentos realizados en el ultracongelador y liofilizador.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Experimento	17	0.09778	0.00575	1.01	0.488
Error	18	0.10222	0.00568		
Total	35	0.20000			

S = 0.07536 R-cuad. = 48.89% R-cuad. (ajustado) = 0.62%



Desv.Est. agrupada = 0.07536

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Experimento

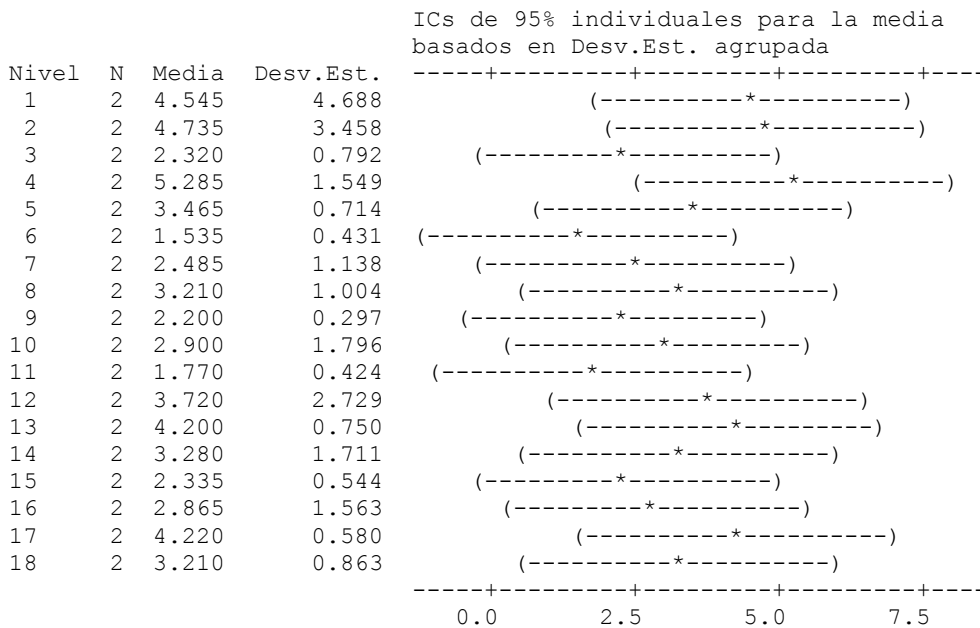
Nivel de confianza individual = 99.92%

Apéndice B

Análisis estadístico (ANOVA) de X al final del proceso de liofilización con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) de los experimentos realizados en el ultracongelador y liofilizador.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Experimento	17	37.86	2.23	0.69	0.777
Error	18	58.21	3.23		
Total	35	96.07			

S = 1.798 R-cuad. = 39.40% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 1.798

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Experimento

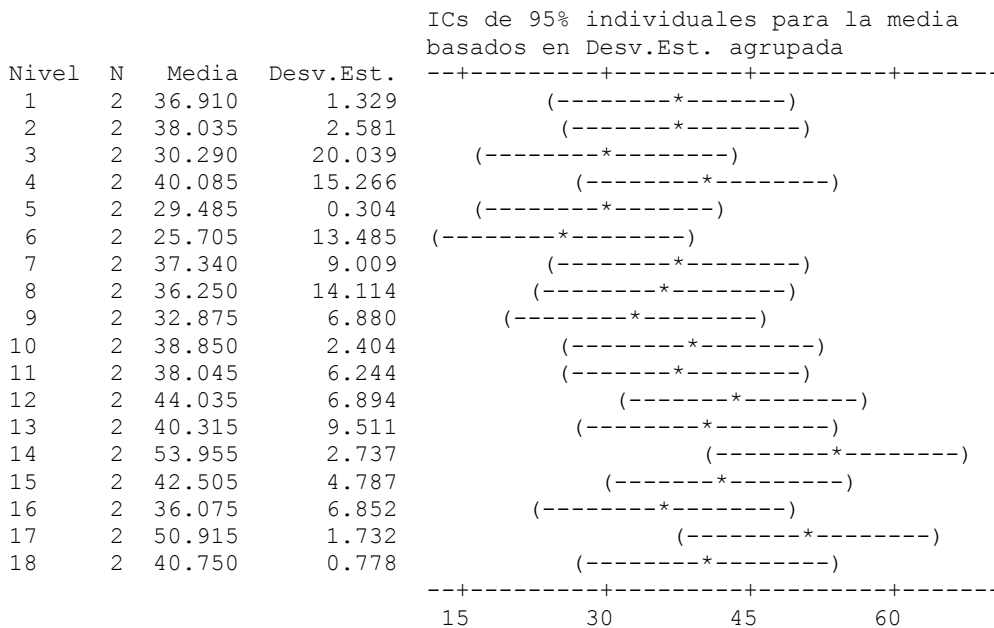
Nivel de confianza individual = 99.92%

Apéndice C

Análisis estadístico (ANOVA) del parámetro de color L* al final del proceso de liofilización con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) de los experimentos realizados en el ultracongelador y liofilizador.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Experimento	17	1619.8	95.3	1.21	0.345
Error	18	1416.4	78.7		
Total	35	3036.2			

S = 8.871 R-cuad. = 53.35% R-cuad.(ajustado) = 9.29%



Desv.Est. agrupada = 8.871

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Experimento
Nivel de confianza individual = 99.92%

Apéndice D

Análisis estadístico (ANOVA) del parámetro de color a* al final del proceso de liofilización con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) de los experimentos realizados en el ultracongelador y liofilizador.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Experimento	17	3.603	0.212	0.77	0.700
Error	18	4.937	0.274		
Total	35	8.540			

S = 0.5237 R-cuad. = 42.19% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 0.5237

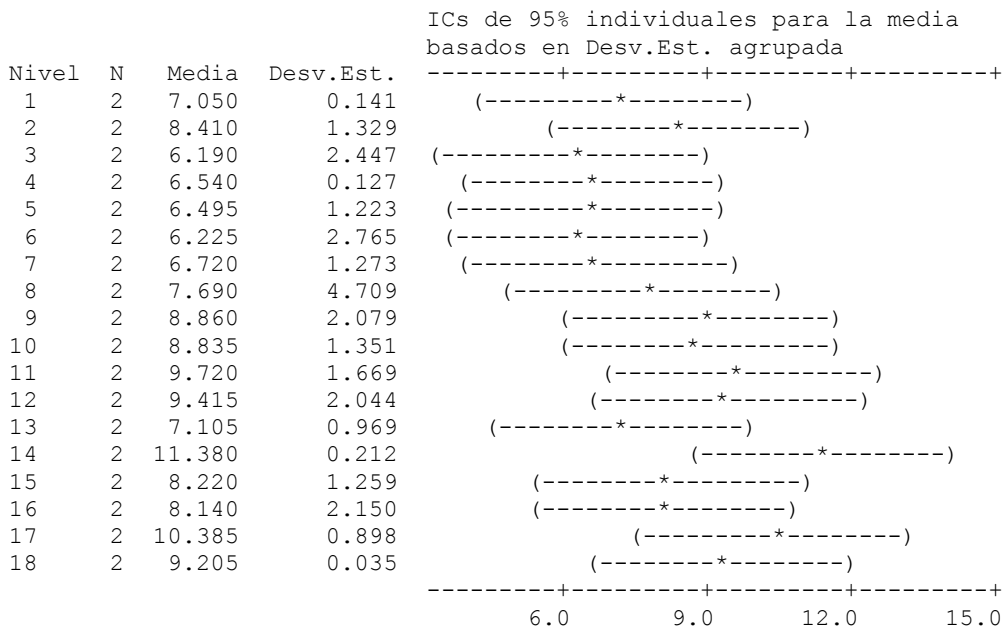
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Experimento
Nivel de confianza individual = 99.92%

Apéndice E

Análisis estadístico (ANOVA) del parámetro de color b* al final del proceso de liofilización con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) de los experimentos realizados en el ultracongelador y liofilizador.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Experimento	17	78.18	4.60	1.34	0.272
Error	18	61.83	3.44		
Total	35	140.01			

S = 1.853 R-cuad. = 55.84% R-cuad.(ajustado) = 14.13%



Desv.Est. agrupada = 1.853

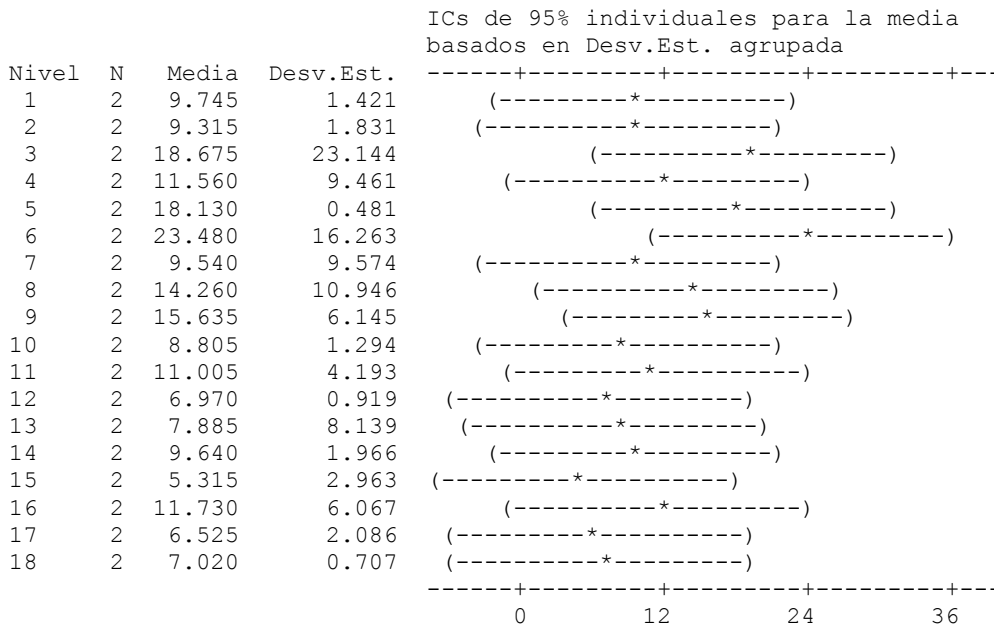
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Experimento
Nivel de confianza individual = 99.92%

Apéndice F

Análisis estadístico (ANOVA) del parámetro de color ΔE al final del proceso de liofilización con prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) de los experimentos realizados en el ultracongelador y liofilizador.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Experimento	17	805.8	47.4	0.66	0.798
Error	18	1285.1	71.4		
Total	35	2090.9			

S = 8.450 R-cuad. = 38.54% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 8.450

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Experimento
Nivel de confianza individual = 99.92%