



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“PROCESO DE CONGELACIÓN Y  
ULTRACONGELACIÓN DE PAPA  
(*Solanum tuberosum*)”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

*I. Q. Rosa María Hernández Rodríguez*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Guadalupe Luna Solano*

CODIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Martha Paola Rascón Díaz*



Orizaba, Veracruz, México.

Septiembre 2016



SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



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

FECHA: 29/09/2016  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I


C. ROSA MARIA HERNANDEZ RODRIGUEZ  
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 CONGELACIÓN Y ULTRACONGELACIÓN DE PAPA (SOLANUM TUBEROSUM) " .

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

ATENTAMENTE

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



990



SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



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

FECHA : 22/09/2016

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. :

ROSA MARIA HERNANDEZ RODRIGUEZ

la cual lleva el título de:

"PROCESO DE CONGELACIÓN Y ULTRACONGELACIÓN DE PAPA (SOLANUM TUBEROSUM) ".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO

SECRETARIO : DRA. MARTHA PAOLA RASCON DIAZ

VOCAL : DR. DENIS CANTU LOZANO

VOCAL SUP. : DR. EUSEBIO BOLAÑOS REYNOSO

FIRMA  
FIRMA  
FIRMA

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

OPCION: I Tesis





**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**  
Aviso de Realización del Acto de Recepción Profesional



Referencia a la Norma ISO 9001; 7.5.1

Revisión: OR-I 01

Código: ITORI-AC-PO-008-03

Página 1 de 1

Fecha: 07/10/2016

Opción: I Tesis

C. Integrantes del jurado

Presidente: DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO  
Secretario: DRA. MARTHA PAOLA RASCON DIAZ  
Vocal: DR. DENIS CANTU LOZANO  
Vocal Sup.: DR. EUSEBIO BOLAÑOS REYNOSO

Por este medio le informo que el Acto de Recepción Profesional del  
C. ROSA MARIA HERNANDEZ RODRIGUEZ  
con No. de control M14011372 egresado del Instituto Tecnológico de Orizaba,  
pasante de la maestría en: CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA se  
realizará el día: Lunes 17 de Octubre de 2016 a las 09 :00 horas en  
la SALA AUDIOVISUAL de POSGRADO. Por lo que se pide su puntual asistencia.

A T E N T A M E N T E

P.A.   
ING. JOSUE JOEL RIVERA MONTALVO  
Jefe de la División de Estudios Profesionales

c.c.p. Archivo  
c.c.p. Candidato  
c.c.p. Recursos Humanos  
c.c.p. Departamento académico  
c.c.p. Departamento de Servicios Escolares



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

“Proceso de congelación y ultracongelación de papa  
(*Solanum tuberosum*)”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

*I.Q. Rosa María Hernández Rodríguez*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Guadalupe Luna Solano*

CODIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Martha Paola Rascón Díaz*

---

---

## **AGRADECIMIENTOS**

### ***Dra. Guadalupe Luna Solano***

*Muchas gracias, Doctora, por haberme permitido ser parte de su equipo de trabajo y por brindarme su asesoría tanto en este proyecto como en todo el trayecto de la maestría. Por contribuir de manera valiosa en mi formación académica y personal, por los conocimientos compartidos, por la motivación, la paciencia y la confianza brindadas, por las experiencias vividas, los consejos y su amistad, ¡gracias!*

### ***Dra. Martha Paola Rascón Díaz***

*Muchas gracias por las contribuciones y el apoyo brindado para la realización de este proyecto, por el tiempo dedicado, por la atención, la amabilidad y la disponibilidad que siempre tuvo para conmigo.*

### ***Dr. Denis Cantú Lozano***

*Le agradezco por las enseñanzas brindadas en el aula de clases, por las anécdotas compartidas, por las aportaciones realizadas a este proyecto, y por la gentileza, la disposición y la paciencia que siempre mostró como profesor.*

### ***Dr. Eusebio Bolaños Reynoso***

*Le agradezco por los conocimientos compartidos en cada una de las materias que me impartió, por haber dado seguimiento a mi formación académica, por las aportaciones realizadas a este trabajo de tesis, y por ser ejemplo de disciplina, orden y constancia en el aula de clases.*

### ***A CONACYT***

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Química que se imparte en esta institución con el número de registro 619368.*



---

---

## **DEDICATORIAS**

### ***A Dios***

*Por permitirme tener una vida hermosa, por seguirme poniendo en el tiempo y espacio perfectos, y demostrarme Su amor en cada detalle de mis días.*

### ***A mi pequeña gran familia***

*El regalo más bello de Dios, por cuidarme, amarme, consentirme, ayudarme e impulsarme en esta travesía. A mi papá, por predicar con el ejemplo y enseñarme disciplina, responsabilidad y perseverancia. A mi mamá, por ser tan paciente conmigo, por transmitirme su fuerza, bondad y amor. A mi hermano Omar, por todos los rídes a la parada del autobús, por estar al pendiente de mí y por su compañía, aunque silenciosa, reconfortante. A mi hermana y mi cuñado, que incondicionalmente me han apoyado y alegrado con su buen humor. A mi Mariel, mi Betito y mi Jeshu, por la interminable alegría, por las enseñanzas que me han dado y por el infinito amor que me demuestran. A los que me hicieron comprender que hay sentimientos que trascienden las dimensiones de tiempo y espacio, Mario y tío Güicho, este trabajo es en memoria de sus sonrisas. A mi tía Francisca y a Guadalupe, por siempre motivarme. Al pequeño Cooper, mi inquieto y juguetero cachorro, por hacerme compañía y esperarme junto al sofá para redactar la tesis.*

### ***A mi mejor amiga, Ale***

*El Universo ha conspirado a nuestro favor para ser compañeras de viaje en esta vida, y aunque este ciclo ha terminado y nuestros rumbos serán distintos, “ésta no es la despedida, es una nueva oportunidad para volvernos a encontrar”. Por ser un soporte inigualable, una fuente de alegría inagotable, por todas las lecciones que hemos aprendido juntas tanto en el aspecto profesional como en el personal, sobre todo en el personal, por preocuparte siempre por mí y por todo lo compartido, este trabajo tiene una dedicación especial para tí. Te quiero con todo el corazón.*

### ***A mis amigos de generación***

*Por haber sido piezas clave en ese año de materias que compartimos juntos, Mari, Lore, Adán y Leo, gracias por las experiencias vividas y por su amistad. A Mariana y Emmanuel, por haber sido parte importante en esta etapa, porque en el primer año de maestría junto a ustedes, al estrés siempre lo convirtieron en momentos de alegría, los quiero muchísimo.*

---

### ***A mis amigos del laboratorio***

*A Cinthia, por ser parte fundamental en este trabajo, por tu paciencia a la hora de enseñarme a pensar como una científica, por tus conocimientos compartidos, por toda la ayuda brindada, por motivarme a diario y por ser una gran amiga; a Alfredo, por siempre tener un tema por el cual reír, por la disponibilidad para ayudar, por el tiempo que invertiste en este trabajo y por también compartir conocimientos conmigo, eres un gran amigo, buen Alfred; A Jose, porque de ti también aprendí mucho, por todas las pláticas interminables que hicieron del trabajo experimental algo divertido, tú también eres una gran amiga. A Camilo, por echar a perder kilos de papa por intentar ayudarme y por las horas de plática mientras repetía sus mediciones 100 veces; a Calis, por siempre mantenerme a alerta, cuidando que mi desayuno no llegara a tus manos; a Alain, por siempre tener una historia nueva que contarme; a Darwin, por haber sido parte del campamento científico en pro de mi experimentación, por la ayuda brindada y por siempre hacerme reír; a Yesenia, por las experiencias compartidas y a Juan Pablo por los momentos alegres en los que hemos convivido. En cada uno de ustedes encontré amigos para toda la vida, hicieron de mi estancia en el laboratorio una experiencia extraordinaria. Gracias por todo lo vivido. Los quiero mucho.*

### ***A mis demás amigos***

*A esos amigos que ya eran parte de mi vida desde antes de iniciar este proyecto, Nícte, Dani Ochoa, Morguís, Paquetox, Ingrid, Karely, Pedro, Enrique, Jesús, Gerardo, Roger, Tepi y David, por su cariño demostrado en todos y cada uno de los momentos en los que me apoyaron, me alentaron y me recordaron que tenía la capacidad para lograr mis metas, los quiero mucho. A los amigos que fui haciendo en el camino, Elío, Karlita, Viera, Jovan, Javier y Carlitos, gracias por todo lo aportado. Y a Yair, por haber hecho de su presencia una motivación incomparable.*

*A ustedes dedico este trabajo, ¡GRACIAS TOTALES!*



---

Esta tesis se desarrolló en el Instituto Tecnológico de Orizaba en el periodo de Agosto 2014- Julio 2016. Las presentaciones en congresos y publicaciones que se obtuvieron de esta tesis se enlistan a continuación:

## PRESENTACIONES EN CONGRESOS

- 2015 Ponencia Efecto de variables de congelación sobre la calidad de la papa (*Solanum tuberosum*). Presentación en el Coloquio de Investigación Multidisciplinaria (CIM) 2015. Orizaba, Veracruz, México. 22-23 Octubre 2015.
- 2016 Ponencia Influencia de la ultracongelación sobre el color, agua congelable e incremento volumétrico de la papa (*Solanum tuberosum*). Presentación en el I Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería Delegación Oaxaca. Tuxtepec, Oaxaca, México. 7-8 Julio 2016.

## PUBLICACIONES

- 2015 R.M. Hernández-Rodríguez, C. Muñoz-López, M.P. Rascón-Díaz, G. Luna-Solano. Efecto de variables del proceso de congelación sobre la calidad de la papa (*Solanum tuberosum*). Revista Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, Vol. 3, Núm.1, Octubre 2015. Orizaba, Veracruz, México.
- 2016 Rosa María Hernández-Rodríguez, Cinthia Muñoz-López, Martha Paola Rascón-Díaz, Guadalupe Luna-Solano. Influencia de la ultracongelación sobre el color, agua congelable e incremento volumétrico de la papa (*Solanum tuberosum*). Memorias del I Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería Delegación Oaxaca, Julio 2016. Tuxtepec, Oaxaca, México.

---

---

## RESUMEN

### Proceso de congelación y ultracongelación de papa (*Solanum tuberosum*)

**Realizado por: I. Q. Rosa María Hernández Rodríguez**

**Dirigido por: Dra. Guadalupe Luna Solano  
Dra. Martha Paola Rascón Díaz**

La papa (*Solanum tuberosum*) es una gran fuente de componentes como carbohidratos, vitaminas y minerales. Por su alto contenido de almidón, ocupa el tercer lugar mundial en importancia como alimento, y el quinto lugar en México. A pesar de su alta producción, el país se ve en la necesidad de importar este tubérculo para cubrir la demanda en el mercado, siendo necesaria su industrialización para disminuir su importación. La congelación y la ultracongelación son una alternativa para preservar el alimento con alta calidad sensorial y nutricional después de su descongelación. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la congelación y ultracongelación sobre las propiedades fisicoquímicas de la papa, como lo son el agua congelable ( $X_{con}$ ), el incremento volumétrico ( $V_{in}$ ), análisis de color (**L**, **a**, **b** y  $\Delta E$ ) y las propiedades térmicas; así como el efecto producido sobre su descongelación. La papa se lavó y cortó en tres formas: bastones (1x1x7 cm), cubos (1x1x1 cm) y hojuelas (5 cm de diámetro y 0.2 cm de espesor). Las muestras fueron tratadas con una solución de NaCl al 0.5% y la mitad de ellas fueron sometidas a pretratamiento con solución de ácido cítrico al 1%. Las muestras tratadas y no tratadas fueron congeladas a -5, -10 y -15 °C (congelación lenta) y a -40, -60 y -80 °C (congelación rápida). Un diseño experimental 3x3x2 fue usado en ambos métodos de congelación. El efecto de la temperatura de congelación fue significativo ( $\alpha= 0.05$ ) sobre la cantidad del  $X_{con}$ , obteniendo como máximo valor un 77.8% y como mínimo un 57.2% en la ultracongelación, y un 73.9% y 45% en la congelación, respectivamente. El  $V_{in}$  final no fue significativo (7%), sin embargo cada experimento presentó diferente comportamiento a través de ambos procesos de congelación. Adicionalmente, se encontró una correlación en el incremento de volumen como función del agua congelable durante ambas congelaciones. Se observó una diferencia significativa en el color de la papa congelada de  $\Delta E= 15.07$  y  $\Delta E= 18.81$ , para la congelación y ultracongelación, con respecto a la papa fresca, siendo el parámetro **L** el que más influencia tuvo en la diferencia de color en ambos procesos. Las condiciones de operación de la ultracongelación mostraron influencia sobre la humedad ( $X$ ), la actividad de agua ( $a_w$ ) y  $\Delta E$ . Las muestras descongeladas respecto al alimento fresco presentaron una pérdida de  $X$ , una ligera disminución de  $a_w$ , un pardeamiento enzimático y una disminución de volumen.



---

---

## ABSTRACT

### Slow and quick freezing process of potato (*Solanum tuberosum*)

By: I. Q. Rosa María Hernández Rodríguez

Advisors: Dra. Guadalupe Luna Solano

Dra. Martha Paola Rascón Díaz

The potato (*Solanum tuberosum*) is a great source of compounds such as carbohydrates, vitamins and minerals. For its high starch content, it takes the third place of the most important foods globally, and the fifth place in Mexico. Despite its high production, this country has the need to import this tuber to supply the demand in the market, being its industrialization necessary to decrease its importation. The slow and quick freezing processes are an alternative to preserve the food with high sensorial and nutritional quality after its thawing. The purpose of this work was to evaluate the effect of slow and quick freezing on physicochemical properties of potato, such as freezable water ( $X_{con}$ ), volumetric increase ( $V_{in}$ ), color analysis (**L**, **a**, **b** y  $\Delta E$ ) and the thermal properties, as well as the effect produced on its thawing. The potatoes were cut in three shapes: batons (1x1x7 cm), cubes (1x1x1 cm) and slices (diameter 5cm and thickness 0.2 cm). The samples were immersed in 0.5% NaCl solution and half of them were pretreated with 1% acid citric solution. The shapes were treated and no treated were frozen at -5, -10 and -15 °C (slow freezing) and at -40, -60 and -80 °C (quick freezing). A 3x3x2 experimental design was used in both freezing process. The effect of frozen temperature was significant ( $\alpha=0.05$ ) on the quantity of  $X_{con}$  obtaining 77.8% as maximum value and 57.2% as a minim value at the quick freezing, and 73.9% and 45% at the slow freezing, respectively. The final  $V_{in}$  was not significant (7%), however, a different behavior is observed for the treatments throughout the both freezing process. Additionally, was found a correlation in volumetric increase as a function of freezable water during the both freezing processes. There was significant difference on the frozen potato color of  $\Delta E=15.07$  y  $\Delta E=18.81$ , for slow freezing and quick freezing with respect to the raw potato. The **L** parameter had major influence in the difference color in both processes. The operating conditions of the quick freezing process showed influence on moisture content ( $X$ ), water activity ( $a_w$ ) y  $\Delta E$ . The thawed samples compared to fresh samples exhibited a loss of  $X$ , a slight decrease of  $a_w$ , an enzymatic browning and a volume decrease.

---

---

## ÍNDICE

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	ix
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	3
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	3
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	4
<b>CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	5
1.1. Generalidades de la papa .....	6
1.1.1. Origen de la especie y distribución .....	7
1.1.2. Descripción botánica y taxonomía .....	8
1.1.2.1. Solanum tuberosum .....	9
1.1.3. Composición y valor nutritivo .....	11
1.1.4. Uso y aplicaciones .....	14
1.1.5. Producción de papa .....	15
1.2. Proceso de congelación .....	17
1.2.1. Mecanismo del proceso de congelación .....	19
1.2.2. Curva de congelación .....	20
1.2.3. Cristalización de agua .....	22
1.2.4. Velocidad de congelación .....	22

---

1.2.4.1.	Congelación lenta .....	22
1.2.4.2.	Congelación rápida .....	23
1.3.	Descongelación.....	24
1.4.	Propiedades fisicoquímicas en alimentos .....	25
1.4.1.	Humedad (X) .....	25
1.4.2.	Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	26
1.4.3.	Agua congelable ( $X_{con}$ ) .....	30
1.4.4.	Incremento de volumen ( $V_{in}$ ).....	31
1.4.5.	Color ( <b>L, a y b</b> ).....	31
1.5.	Propiedades térmicas en alimentos .....	34
1.5.1.	Conductividad térmica (k) .....	34
1.5.2.	Calor específico (Cp) .....	35
1.6.	Diseño de experimentos.....	36
1.6.1.	Modelos mixtos.....	37
1.7.	Estudios realizados sobre la papa .....	38
1.8.	Aplicación de congelación a la papa .....	38
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
2.1.	Metodología general.....	42
2.2.	Selección de la materia prima .....	43
2.3.	Acondicionamiento de la muestra .....	43
2.4.	Proceso de congelación.....	44
2.4.1.	Proceso de congelación .....	44
2.4.1.1.	Diseño de experimentos .....	45

---

---

2.4.2. Proceso de ultracongelación .....	46
2.4.2.1. Diseño de experimentos .....	47
2.5. Análisis fisicoquímico de la papa .....	48
2.5.1. Determinación de proteínas.....	48
2.5.2. Determinación de grasas .....	49
2.5.3. Determinación de carbohidratos .....	49
2.5.4. Determinación de cenizas .....	50
2.5.5. Contenido de humedad .....	50
2.5.6. Actividad de agua .....	50
2.5.7. Contenido de agua congelable .....	51
2.5.8. Incremento de volumen .....	51
2.5.9. Análisis de color.....	51
2.6. Proceso de descongelación .....	52
2.7. Análisis térmico de la papa .....	52
2.7.1. Determinación de la conductividad térmica de la papa.....	53
2.7.2. Determinación del calor específico de la papa .....	55
2.8. Análisis estadístico.....	56
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>57</b>
3.1. Caracterización fisicoquímica de la papa .....	58
3.2. Congelación de papa .....	59
3.2.1. Cantidad de agua congelable de la papa durante el proceso de congelación.....	59
3.2.1.1. Curva de evolución de congelación del agua.....	60



---

---

3.2.2. Incremento de volumen de la papa durante el proceso de congelación. ....	63
3.2.2.1. Curva de evolución de incremento de volumen .....	64
3.2.3. Comparación y análisis de color de la papa fresca y congelada .....	67
3.2.4. Características finales de la papa congelada .....	69
3.3. Ultracongelación de papa.....	71
3.3.1. Cantidad de agua congelable de la papa durante el proceso de ultracongelación.....	72
3.3.1.1. Curva de evolución de ultracongelación del agua.....	72
3.3.2. Incremento de volumen de la papa durante el proceso de ultracongelación.....	75
3.3.2.1. Curva de evolución de incremento de volumen .....	75
3.3.3. Comparación y análisis de color de la papa fresca y ultracongelada ....	79
3.3.4. Características finales de la papa ultracongelada .....	82
3.4. Cálculo de propiedades térmicas al final del proceso de congelación y ultracongelación.....	84
3.4.1. Conductividad térmica (k) .....	84
3.4.2. Calor específico (Cp) .....	87
3.5. Descongelación.....	90
3.5.1. Descongelación de la papa congelada .....	90
3.5.2. Descongelación de la papa ultracongelada .....	95
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>105</b>

---

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
1.1 Planta de la papa ( <i>Solanum tuberosum</i> ) (CIP, 2014).....	10
1.2 Distribución de la producción de papa por estado (SIAP, 2015).....	15
1.3 Producción de papa en el estado de Veracruz (SIAP, 2015).....	16
1.4 Curva de congelación del agua (Umaña, 2007).....	21
1.5 Visión esquemática de los procesos de congelación de una sustancia pura (agua) y de un alimento (a dos velocidades de congelación) (Orrego, 2008).....	21
1.6 Migración de agua intracelular en congelación lenta (Barreiros y Sandoval, 2006).....	23
1.7 Migración de agua intracelular en congelación rápida (Barreiros y Sandoval, 2006).....	24
1.8 Relación entre la presión relativa de vapor y la temperatura para un alimento complejo por encima y por debajo del punto de congelación (Fennema, 1996).....	29
1.9 Escala de colores opuestos <b>L, a, b</b> (Hunterlab, 2012).....	32
2.1 Metodología general aplicada para el proceso de congelación y ultracongelación de la papa.....	42
2.2 Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> ) seleccionada.....	43
2.3 Formas empleadas para el estudio de la papa: a) cubos, b) bastones y c) hojuelas.....	43
2.4 Congelador marca Daewoo modelo DFR-25106B.....	44
2.5 Ultracongelador marca So-Low modelo U85-13.....	46
3.1 Evolución de la congelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa: a) -5 °C, b) -10 °C y c) -15 °C.....	61
3.2 Evolución de la congelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa pretratada: a) -5 °C, b) -10 °C y c) -15 °C.....	63
3.3 Evolución de $V_{in}$ de cubos, bastones y hojuelas de papa durante el	

---

proceso de congelación a: a) -5 °C, b) -10 °C y c) -15 °C.....	64
3.4 Evolución de $V_{in}$ de cubos, bastones y hojuelas de papa con pretratamiento durante el proceso de congelación a: a) -5 °C, b) -10 °C y c) -15 °C.....	66
3.5 Muestras de papa congelada a diferentes condiciones.....	71
3.6 Evolución de la ultracongelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.....	73
3.7 Evolución de la ultracongelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa pretratada: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.....	74
3.8 Evolución de $V_{in}$ de cubos, bastones y hojuelas de papa durante el proceso de ultracongelación a: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.....	76
3.9 Evolución de $V_{in}$ de cubos, bastones y hojuelas de papa con pretratamiento durante el proceso de ultracongelación a: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.....	78
3.10 Muestras de papa ultracongelada a diferentes condiciones.....	84
3.11 Calor específico aparente de la papa a diferentes temperaturas.....	89
3.12 Muestras de papa descongelada después de la congelación.....	94
3.13 Muestras de papa descongelada después de la ultracongelación.....	100

---

---

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Pág.
1.1 Clasificación científica de la papa (SIOVM, 1999; Pumisacho y Sherwood, 2002).....	9
1.2 Composición química de la papa en base húmeda (Singh y Kaur, 2009).....	13
1.3 Presiones de vapor y relación de presiones de vapor de agua y hielo (Fennema, 1996).....	29
2.1 Diseño experimental 3x3x2 aplicado al proceso de congelación.....	45
2.2 Diseño experimental 3x3x2 aplicado al proceso de ultracongelación.	47
2.3 Ecuaciones de propiedades térmicas para componentes del alimento ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (ASHRAE, 2006) .....	52
2.4 Ecuaciones de propiedades térmicas para agua y hielo <sup>a</sup> ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (ASHRAE, 2006).....	53
3.1 Caracterización fisicoquímica y térmica de la papa ( <i>Solanum tuberosum</i> ).....	58
3.2 Parámetros de color <b>L</b> , <b>a</b> , <b>b</b> y $\Delta E$ para los distintos experimentos de congelación.....	68
3.3 Resultados experimentales finales de la papa congelada.....	70
3.4 Parámetros de color <b>L</b> , <b>a</b> , <b>b</b> y $\Delta E$ para los distintos experimentos de ultracongelación.....	80
3.5 Resultados experimentales finales de la papa ultracongelada.....	83
3.6 Conductividades térmicas obtenidas para los diferentes experimentos de congelación.....	85
3.7 Conductividades térmicas obtenidas para los diferentes experimentos de ultracongelación.....	86
3.8 Calor específico aparente para los diferentes experimentos de congelación.....	87



---

3.9	Calor específico aparente para los diferentes experimentos de ultracongelación.....	88
3.10	Características fisicoquímicas de papa descongelada después de la congelación.....	91
3.11	Características fisicoquímicas de papa descongelada después de la ultracongelación.....	96

---

---

## INTRODUCCIÓN

La industria de los alimentos ha tenido como principal objetivo la conservación de los mismos, puesto que el prolongar la vida de anaquel de los alimentos para su distribución y comercialización durante y después de temporada, es indispensable para el ser humano.

La preservación de alimentos por bajas temperaturas, como lo son la refrigeración y congelación, se caracterizan por ser tecnologías limpias, eficaces y capaces de preservar considerablemente la calidad sensorial y nutricional de los alimentos, asemejándose en gran medida a sus características en estado fresco. Existen dos tipos de congelación, las cuales dependen de la velocidad de cristalización: la congelación lenta y la congelación rápida.

La congelación lenta produce un número reducido de cristales grandes de hielo, que conlleva daños físicos al tejido y desnaturalización proteica por el efecto salino, reduciendo la capacidad de retención de agua en el tejido. La congelación rápida (ultracongelación) produce un gran número de pequeños cristales, menos desnaturalización de la proteína, menores daños físicos celulares y mayor capacidad de retención de agua en el tejido (Barreiro y Sandoval, 2006; Orrego, 2003; Umaña, 2007).

En la actualidad, la papa se ha convertido en un importante eslabón alimenticio dentro de la dieta humana, ocupando en México como en el mundo uno de los primeros cinco lugares en importancia como alimento. Este tubérculo por excelencia presenta abundancia en carbohidratos y micronutrientes, así como el contenido de proteína es mayor en comparación a otros tipos de tubérculos, posicionándolo como un producto de interés de estudio.

---

La papa es una hortaliza con diversos usos y consumos, el principal uso es en fresco, así como también se encuentran los bastones de papa precocida, las hojuelas de papa, la fécula o almidón de papa, la harina, el puré, la mayonesa y jaleas de papa, entre otros (FAO, 2008; CONPAPA, 2015). Por su versatilidad, la demanda de este producto en la industria es creciente y la exigencia de los consumidores cada vez es mayor, debido a ello se requieren de métodos que permitan la preservación de dicho alimento presentando la misma cantidad de propiedades que poseía al estar totalmente fresco.

En este contexto el objetivo de esta investigación fue analizar los efectos de los procesos de congelación y ultracongelación en papa (*Solanum tuberosum*) sobre las características fisicoquímicas del alimento (agua congelable, incremento de volumen y color), sus propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico), así como la descongelación de la misma a las mejores condiciones de operación obtenidas.

---

---

## OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la congelación y ultracongelación sobre las características fisicoquímicas de la papa.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente la papa (*Solanum tuberosum*).
- Obtener las curvas de evolución de cantidad de agua congelable e incremento volumétrico del proceso de congelación y ultracongelación de papa.
- Aplicar un diseño de experimentos que permita evaluar los efectos de las variables de congelación y ultracongelación sobre las propiedades fisicoquímicas de las muestras de papa.
- Evaluar el efecto de la descongelación sobre las características fisicoquímicas de la papa.



---

---

## JUSTIFICACIÓN

El estado de Veracruz es uno de los mayores productores a nivel nacional de diferentes variedades de papa, sin embargo su aprovechamiento como materia prima para producir diversos productos no ha sido explotado y se ve en la necesidad de importar, por lo cual es necesario el estudio y aplicación de nuevos procesos a la papa para aumentar su valor agregado, e incursionar en su industrialización con el propósito de disminuir las importaciones de papa procesada.

Cada método de preparación afecta directamente la composición de la papa en diversas formas, principalmente afectan la estructura del tejido y reducen el contenido de proteínas, el empleo de calor destruye los nutrientes o produce cambios químicos, como la oxidación o el pardeamiento enzimático, produciendo una pigmentación oscura que le dan apariencia no agradable al consumidor.

Sin embargo, la congelación es considerada uno de los mejores métodos de preservación de alimentos por bajas temperaturas, ya que no sólo conserva las propiedades químicas, sino que también conserva la apariencia física del alimento fresco. Motivo por el cual se empleó en la presente investigación la congelación y ultracongelación, ya que es un proceso idóneo para prolongar la vida útil del producto, manteniendo sus características fisicoquímicas después del proceso.

**CAPÍTULO 1**  
**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1. Generalidades de la papa

La papa (*Solanum tuberosum*) es una herbácea anual originaria y domesticada en la frontera de Bolivia y Perú, que logra alcanzar una altura de un metro y produce un tubérculo, la papa misma, con abundante contenido de almidón, tal que ocupa el tercer lugar mundial en importancia como alimento, después del arroz y el trigo, y es cultivada en cerca de 130 países, en clima templado, subtropical y tropical (FAO, 2008; CIP, 2014).

Dicha hortaliza tiene diversos usos y consumos. Su uso alimentario principal es en fresco, para elaborar una amplia variedad de platillos gastronómicos y para obtener productos alimentarios industriales, como lo son las hojuelas crocantes, bastones de papa precocida, purés, mayonesas, jaleas, harinas y almidón; para consumo animal se utiliza como ingrediente en la elaboración de piensos compuestos para ganado bovino, porcino y aves de corral, en forrajes y abonos. En la industria química se emplea para la extracción de alcohol y con éste fabricar licores, esencias, aromas, cosméticos, medicinas, solventes, aditivos, combustibles, etc. La papa fresca deshidratada puede emplearse como conglutinante (FAO, 2008; CONPAPA, 2013).

Culturas antiguas como la Inca, la Tiahuanaco, la Nazca y la Mochica, cultivaron este tubérculo al que llamaban “papa” en quechua, mientras que en la zona del Caribe, los tainos cultivaban otro tubérculo de aspecto similar, al que llamaban batata, conocido también como camote. Esto provocó posiblemente por una confusión, que los españoles la llamaran “patata”. Dicho término se aplicó a ambas plantas aproximadamente durante un siglo. Actualmente, el tubérculo es llamado patata en España, y en América se continúa llamando papa (Navarro, 2000; Pumisacho y Sherwood, 2002; FAO, 2008).

### 1.1.1. Origen de la especie y distribución

Es originaria del altiplano peruano-boliviano en Sudamérica desde hace 10 500 años, su domesticación y cultivo ocurrieron posteriormente. Dicha especie se diversificó primariamente en la zona andina, desde Colombia, atravesando Ecuador, Perú, Bolivia, hasta la parte norte de Chile y Argentina. Los centros secundarios de diversificación correspondieron a Mesoamérica, comprendiendo el sur de México, Guatemala, El Salvador, partes occidentales de Honduras, Nicaragua y el noreste de Costa Rica, hasta Venezuela y el sur de Chile.

Posteriormente, en la conquista española de la civilización inca en Perú, el cultivo fue sustraído e introducido en Europa, iniciando en 1565 en España. En 1573 ya se cultivaba en la península Ibérica, y para 1597 el tubérculo ya había llegado a Francia y los Países Bajos. A principios del siglo XVII la papa llegó a la India, China y Japón mediante los marineros, que la llevaban para consumirla en sus largas travesías. Finalmente, después de ser acogida en Irlanda, fue llevada por emigrantes irlandeses a América del Norte a principios del siglo XVIII (Montaldo, 1984; SIOVM, 1999; FAO, 2008).

De las especies conocidas dentro del género de *Solanum*, entre 160 y 180 forman tubérculos, y de éstos solo ocho son especies comestibles cultivadas (Pumisacho y Sherwood, 2002). La papa (*Solanum tuberosum*) se cultiva en más de 100 países, en clima templado, subtropical y tropical (FAO, 2008). En el continente americano hay unas 200 especies de papas silvestres, México, Bolivia y el norte de Argentina se consideran centros de diversificación de éstas. La mayoría de especies crecen en los Andes, de las cuales 28 se desarrollan en México, localizándolas en todos los estados, con excepción de Baja California, Campeche, Tabasco, Quintana Roo y Yucatán (Morales, 2011).

México no es centro de origen de la papa, sin embargo el país cuenta con amplia diversidad de germoplasma. Las variedades de papa cultivadas en México se

clasifican en tres grupos: genotipos provenientes de Europa, que representa 50% de las variedades cultivadas (Alpha); los genotipos provenientes de Estados Unidos de América, que constituye un 38% de las variedades; y los genotipos mejorados por organismos nacionales como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), que corresponden alrededor de 8%. Las zonas aledañas a los volcanes de Toluca y al Pico de Orizaba son los principales centros de diversidad y producción de papas criollas en México (Onamu *et al.*, 2015).

### 1.1.2. Descripción botánica y taxonomía

La familia Solanaceae se distribuye geográficamente en todo el mundo, sobre todo en los trópicos, los subtropicos y los neotrópicos, especialmente en Sudamérica. Dicha familia presenta aproximadamente 102 géneros y 2460 especies a nivel mundial.

Los géneros más importantes son: *Solanum*, compuesto por 1400 especies; *Lyciantes*, constituido por 200 especies; *Cestrum*, formado por 175 especies; *Nicotiana*, que comprende 100 especies; y *Lycium*, que abarca 90 especies.

Las especies más cultivadas de la familia Solanaceae son la papa (*Solanum tuberosum*), el tomate (*Lycopersicon esculentum*), la berenjena (*Solanum melongena*) y el chile (*Capsicum*). Algunos cultivos menores son el tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*), el pepino melón (*Solanum muricatum*) y la uvilla (*Physalis peruviana*). La familia Solanaceae es también conocida por la variedad de alcaloides, dándole la reputación de ser tóxica. Incluye también especies ornamentales, como por ejemplo híbridos de *Petunia* (SPV, 2015).

Del género *Solanum*, la especie *S. tuberosum*, es probablemente la más importante de la sección *Petota*, no sólo porque agrupa casi la mitad del total de especies

tuberíficas silvestres, sino porque incluye todas las especies cultivadas (Ochoa, 1999). La Tabla 1.1 muestra la clasificación científica de *Solanum tuberosum*.

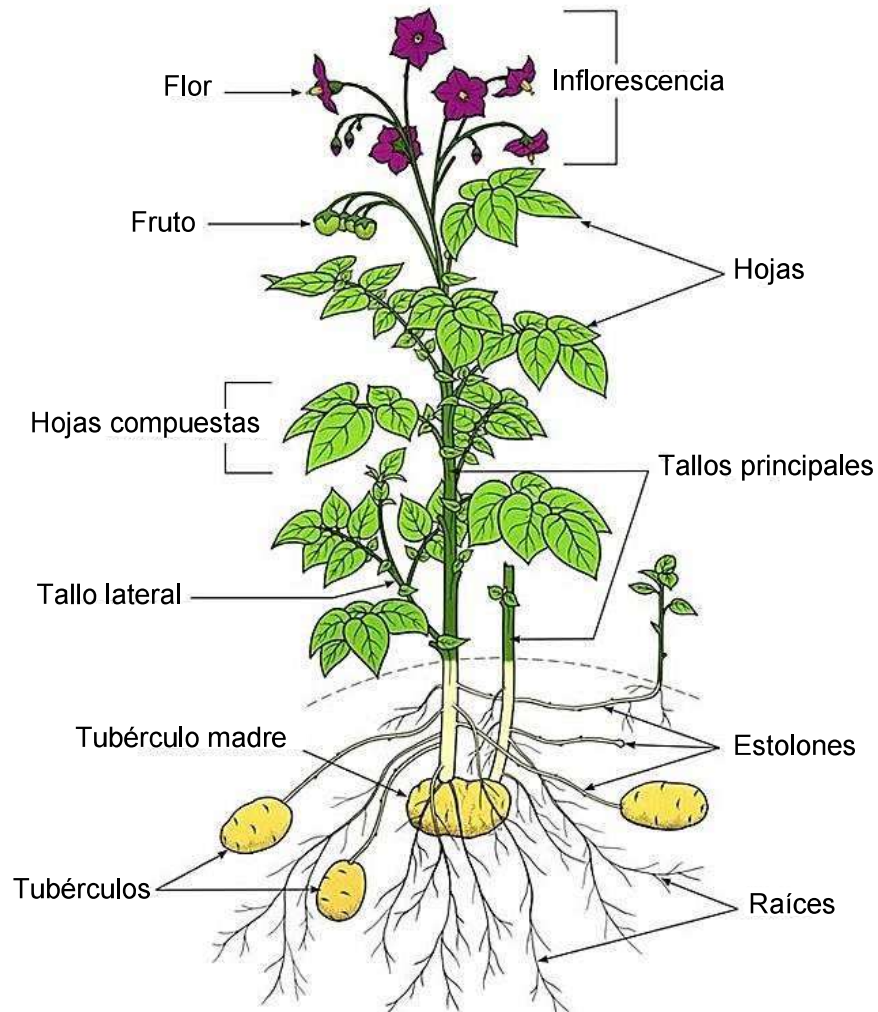
**Tabla 1.1** Clasificación científica de la papa (SIOVM, 1999; Pumisacho y Sherwood, 2002).

<b>Reino</b>	Plantae
<b>División</b>	Magnoliophyta
<b>Clase</b>	Magnoliopsida
<b>Orden</b>	Solanales
<b>Familia</b>	Solanaceae
<b>Género</b>	<i>Solanum</i>
<b>Subgénero</b>	Potatoe
<b>Sección</b>	Petota
<b>Especie</b>	<i>tuberosum</i>

#### 1.1.2.1. *Solanum tuberosum*

Éste tubérculo habita en climas cálido, semicálido y templado (BDMTM, 2009), su mejor producción ocurre donde la temperatura diaria se mantiene en promedio de 15 a 20 °C. La papa es una planta que tiene gran capacidad de adaptación, pues es tolerante a bajas temperaturas, aunque no a heladas constantes, ya que el frío excesivo perjudica los tubérculos, dejándolos pequeños y sin desarrollar; por el contrario, si la temperatura es demasiado elevada afecta a la formación de los mismos y favorece el desarrollo de plagas y enfermedades (SIOVM, 1999). En algunas tierras altas subtropicales, las temperaturas benignas y la elevada radiación solar permite a los agricultores cultivar la papa todo el año, y cosechar los tubérculos a los 90 días de haberlos sembrado, mientras que en climas más fríos, pueden ser necesarios hasta 150 días (FAO, 2008). Dicha especie representa diferentes épocas de fructificación con base a la región del cultivo y a la variedad cultivada. En México, durante la temporada primavera-verano inician de septiembre a octubre y en temporada otoño-invierno a partir de mayo (SIOVM, 1999).

Es una herbácea anual por su parte aérea, y perenne por sus tubérculos, que logra alcanzar un metro de altura. Las flores de la planta son hermafroditas, tetracíclicas y pentámeras, tienen forma de campana, son de color azul violáceo y aparecen agrupadas, con cinco estambres cada una; la inflorescencia es cimosa (Montaldo, 1984; BDMTM, 2009). La Figura 1.1 muestra a la planta de la papa (*Solanum tuberosum*).



**Figura 1.1** Planta de la papa (*Solanum tuberosum*) (CIP, 2014).

Posee un tallo principal, y a veces varios tallos, dependiendo del número de yemas que hayan brotado del tubérculo. Dichos tallos son de sección angular, y en las axilas de las hojas con los tallos se forman ramificaciones secundarias. Las hojas al igual

que los tallos subterráneos son alternas. Las primeras hojas tienen aspecto simple, vienen después las hojas compuestas, imparinadas con 3-4 pares de hojuelas laterales y una hojuela terminal. Entre las hojuelas laterales hay pequeñas de segundo orden.

Las raíces se desarrollan principalmente en verticilo, en los nudos del tallo principal. La planta de la papa (*Solanum tuberosum*) posee un sistema radicular fibroso muy ramificado. El fruto es una baya bilocular de 15-30 mm de diámetro, el color verde, verde-amarillento o verde-azulado. Cada fruto contiene aproximadamente 200 semillas (Montaldo, 1984). Al crecer, las hojas compuestas de la planta producen almidón, el cual se desplaza hacia la parte final de los tallos subterráneos, también llamados estolones. Como consecuencia, estos tallos sufren un engrosamiento, produciendo hasta 20 tubérculos, el número de tubérculos que maduran depende de la disponibilidad de humedad y nutrientes del suelo. Los tubérculos pueden tener formas y tamaños distintos, y por lo general pesa hasta 300 g.

Cuando el período de crecimiento finaliza, las hojas y tallos de la planta se marchitan y los tubérculos se desprenden de los estolones. A partir de este momento, los tubérculos funcionan como depósito de nutrientes que permite a la planta subsistir en el frío y posteriormente reverdecer y reproducirse (FAO, 2008).

Cada tubérculo en su superficie posee yemas auxiliares, cada yema representa una rama lateral del tallo subterráneo, las cuales son protegidas por hojas escamosas distribuidas en espiral, denominados también ojos. De estos ojos brotan las nuevas plantas, cuando las condiciones vuelven a ser favorables (Montaldo, 1984; FAO, 2008).

### **1.1.3. Composición y valor nutritivo**

La papa (*Solanum tuberosum*) se caracteriza por ser un alimento versátil con un gran contenido de carbohidratos. Recién cosechada, contiene un 80% de agua y un 20%



de materia seca. De ésta materia seca, entre el 60% y el 80% es almidón. Respecto a su peso en seco, el contenido de proteína de la papa es análogo al de los cereales, y es muy alto en comparación con otras raíces y tubérculos (FAO, 2008).

La calidad y cantidad de las sustancias nutritivas del tubérculo dependen de la variedad de papa, condiciones del campo y del crecimiento del cultivo. El contenido de agua en un tubérculo fresco varía entre 63% a 87%; de hidratos de carbono, 13% a 30% (incluyendo el contenido de fibra 0.17% a 3.48%), de proteínas 0.7% a 4.6%; de grasas entre 0.02% a 0.96%; y de cenizas, 0.44% a 1.9%. Otros constituyentes básicos son azúcares, vitaminas, y minerales (Pumisacho y Sherwood, 2002). La Tabla 1.2 muestra la composición química del alimento en fresco.

Los carbohidratos de la papa incluyen almidón, celulosa, glucosa, sacarosa y pectinas. Los almidones de la papa son amilosa y amilopectina en la proporción 1:3; En la fibra se incluye: fibra cruda, celulosa, hemicelulosa y sustancias pécticas; las proteínas de la papa son casi exclusivamente globulinas (tuberina), el contenido de metionina y cistina es bajo. Dentro de los aminoácidos esenciales presentes, están: lisina, valina, fenilalanina, treonina, leucina, isoleucina y metionina. Presenta minerales, como: potasio, sodio, magnesio, calcio, hierro, fosforo, azufre, silicio, aluminio, manganeso y cloro. La papa es una buena fuente de vitamina C, regular de niacina y tiamina, y baja en vitamina A y riboflavina (Montaldo, 1984).

Los seres humanos al no poder digerir el almidón que contienen las papas crudas, las consumen hervidas, con o sin piel, al horno o fritas. Cada método de preparación afecta la composición de la papa en diversas formas, principalmente reducen el contenido de fibra y proteínas, además de que el empleo de calor destruye estos nutrientes o se producen cambios químicos, como la oxidación.

Al hervir las papas, se pierde gran cantidad de vitamina C, sobre todo en las papas peladas. Las papas a la francesa y las hojuelas de papa, al ser freídas en aceite caliente (140-180 °C) presentan gran absorción de grasa y reducción en el contenido de minerales y ácido ascórbico. En general, la preparación al horno causa una

pérdida un poco mayor de vitamina C que la cocción en agua, pues la temperatura es más elevada, pero en cambio se pierden menos vitaminas y minerales (FAO, 2008).

**Tabla 1.2** Composición química de la papa en base húmeda (Singh y Kaur, 2009).

<b>Componente</b>	<b>Contenido</b>
Materia seca	15-28%
Almidón	12.6-18.2%
Glucosa	0.01-0.6%
Fructuosa	0.01-0.6%
Sacarosa	0.13-0.68%
Fibra	1-2%
Lípidos (grasa)	0.075-0.2%
Proteínas	0.6-2.1%
Asparagina (libre)	110-529 mg/100 g
Glutamina (libre)	23-409 mg/100 g
Prolina (libre)	2-209 mg/100 g
Otros aminoácidos (libres)	0.2-117 mg/100 g
Polifenoles	123-441 mg/100 g
Carotenoides	0.05-2 mg/100 g
Tocoferoles	Arriba de 0.3 mg/100 g
Tiamina B1	0.02-0.2 mg/100 g
Riboflavina	0.01-0.07 mg/100 g
Vitamina B6	0.13-0.44 mg/100 g
Vitamina C	8-54 mg/100 g
Vitamina E	~ 0.1 /100 g
Ácido fólico	0.01-0.03 mg/100 g
Nitrógeno (total)	0.2-0.4%
Potasio	280-564 mg/100 g
Fósforo	30-60 mg/100 g
Calcio	5-18 mg/100 g
Magnesio	14-18 mg/100 g
Hierro	0.4-1.6 mg/100 g
Zinc	~ 0.3 mg/100 g
Glicoalcaloides	< 20 mg/100 g

#### 1.1.4. Uso y aplicaciones

La producción de dicho tubérculo es destinado en un 56% al mercado fresco, el 29% a la industria y el 15% a la siembra (CONPAPA, 2015).

Como uso alimentario, la papa se consume fresca, pero para el consumo mundial la papa está pasando a los productos alimentarios industriales, con valor añadido. Los principales elementos son las papas congeladas, que constituyen la mayor parte de papas fritas a la francesa que se sirven en el mundo, y las hojuelas crocantes de papa. También existen copos de papa deshidratada y papa granulada, con la cual se elabora puré de papa, como ingrediente para preparar aperitivos y hasta como ayuda alimentaria.

La harina de papa y el almidón extraído de la papa, se utiliza como espesante en las salsas, sopas y cocidos; como aglutinante en las harinas para pastel, las masas, las galletas y el helado debido a que es un polvo fino con excelente textura y que carece de sabor. Las papas molidas se someten a tratamientos térmicos para convertir su almidón en azúcares, los cuales se fermentan y posteriormente se destilan, para producir bebidas alcohólicas, como el vodka.

Para usos no alimentarios, el almidón de la papa es ampliamente utilizado por las industrias farmacéutica, textil, de la madera y del papel, como adhesivo, aglutinante, texturizador y relleno, y por las compañías que perforan pozos petroleros, para lavar los pozos. El almidón de papa es un sustituto 100% biodegradable del poliestireno y se utiliza, por ejemplo, para hacer platos y cubiertos desechables. La cáscara de la papa y otros desechos de la industria de la papa se emplean para obtener etanol apto para la producción de combustibles. Así como dicho tubérculo también puede usarse como ingrediente para piensos para los animales de granja.

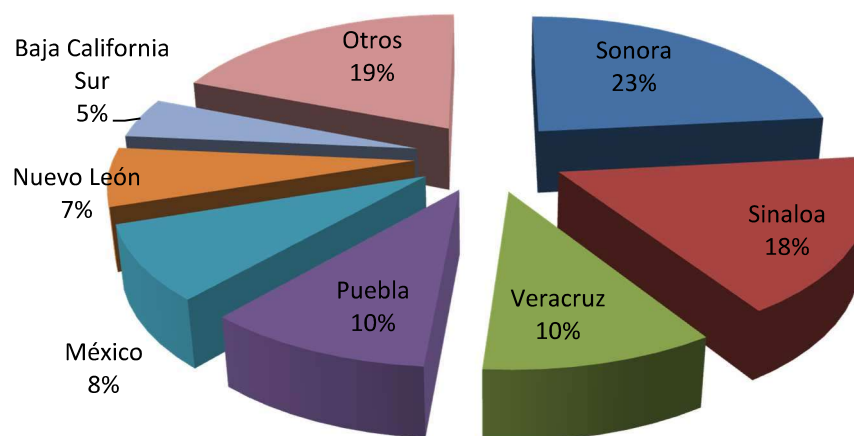
En comparación a otros cultivos, se acostumbra a producir las papas en forma vegetativa, es decir, a partir de otras papas. Por lo que una parte de la cosecha anual se utiliza de nuevo en la siguiente siembra (FAO, 2008; CIP, 2014).

### 1.1.5. Producción de papa

En el 2013, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT, por sus siglas en inglés), China se convirtió en el primer productor de papa, seguido por India, Rusia, Ucrania y EUA. A nivel mundial, México se posicionó en el 38° lugar.

En México, la papa ocupa el 5° lugar en el renglón alimenticio, siendo el maíz, frijol, trigo y arroz los cuatro primeros (CONPAPA, 2015).

La producción nacional de papa en el 2014 fue de 1 678 833.03 toneladas, siendo los principales productores Sonora, Sinaloa, Veracruz, Puebla, México, Nuevo León y Baja California Sur, aportando el 81% de la producción total, como se muestra en la Figura 1.2.

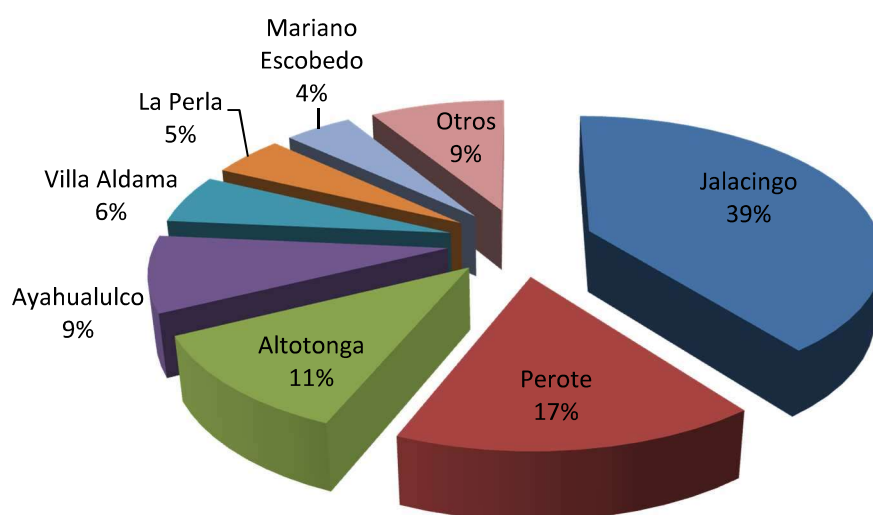


**Figura 1.2** Distribución de la producción de papa por estado (SIAP, 2015).

Como cultivo la papa a nivel nacional en el año agrícola 2014, la papa ocupó el lugar 16° por superficie sembrada, el lugar 22° a nivel nacional por su producción y el 6° lugar por su valor de producción después del maíz grano, sorgo grano, chile verde, tomate rojo (jitomate) y trigo grano (SIAP, 2015).

El estado de Veracruz ocupó el tercer lugar de producción a nivel nacional en el 2014, con 174 238.25 toneladas, de las cuales el 91.2% fue producido por los municipios de Jalacingo, Perote, Altotonga, Ayahualulco, Villa Aldama, La Perla y Mariano Escobedo, como se observa en la Figura 1.3 (SIAP, 2015).

El destino de la producción de papa en el país es principalmente el consumo nacional. En el 2014, de las 1.68 millones de toneladas producidas, sólo cerca de 30 mil toneladas (1.7%) se destinaron al mercado de exportación: papas preparadas sin congelar (90%) y el resto de las exportaciones (10%), fueron papa fresca, fécula de papa, papa para siembra, papa preparada congelada, papas cocida en agua o vapor congeladas, e incluso papa cortada. En contraste, ese mismo año se importaron más de 280 mil toneladas: papas preparadas congeladas (50%), frescas (36%) y el resto de las importaciones (14%), corresponde a fécula de papa, papa preparada sin congelar, papa para siembra, papa en salmuera, papa cocida en agua o vapor congeladas, y papa cortada (SIAP, 2015; CONPAPA, 2015).



**Figura 1.3** Producción de papa en el estado de Veracruz (SIAP, 2015).

## 1.2. Proceso de congelación

La preservación de los alimentos por bajas temperaturas brinda un mayor tiempo de vida de anaquel a diferencia de otros métodos de conservación (Aguilar, 2012). Existen tres procesos fundamentales en la conservación de alimentos a bajas temperaturas: la refrigeración, la congelación y la descongelación (Barreiro y Sandoval, 2006).

Estos procesos no mejoran la calidad del producto final, por lo que la calidad de la materia prima es muy importante, así como el proceso aplicado, el embalaje utilizado, los tiempos y las temperaturas usadas en la cadena de frío y la descongelación antes del consumo.

Después de la refrigeración, la congelación es considerada una de las tecnología más limpias y eficaces por preservar significativamente la calidad sensorial y nutricional de los alimentos, por poderse realizar con costes competitivos y por permitir la comercialización a largo plazo (Umaña, 2007).

El objetivo de la congelación es preservar el producto en condiciones naturales, sin agregar algún conservador. Ésta no esteriliza, sólo conserva y previene que los agregados químicos se trasladen a otros alimentos. Una limitación de este método, es que si existe alguna contaminación, ésta también se congela, y se activará al descongelar el alimento, puesto que algunos microorganismos sobreviven al frío. Por ello, cuando se descongela el alimento se debe cocinar inmediatamente, para evitar que los microorganismos comiencen a degradar el alimento (Aguilar, 2012).

El componente mayoritario en los alimentos es el agua, su contenido varía dependiendo su composición pero especialmente de la cantidad de grasa presente, a mayor cantidad de grasa menor será el contenido de agua. En los productos de origen vegetal el contenido de agua oscila entre 75 y 95% (Barreiro y Sandoval, 2006).

El proceso de congelación se caracteriza por el cambio de fase del agua presente en los alimentos, del estado líquido al estado sólido. Dicho elemento es el que congela primordialmente, los otros componentes usuales en los alimentos, como carbohidratos, proteínas y minerales, no llevan este cambio de fase marcado, sólo los lípidos pueden también solidificar en el proceso. Al mismo tiempo, como el agua se solidifica y fija, no puede intervenir más como vehículo de reacciones químicas, bioquímicas y microbiológicas, además se produce una desecación del alimento, lo que contribuye de forma significativa a una mejor conservación del mismo (Barreiro y Sandoval, 2006; Umaña, 2007).

El agua en los alimentos se puede clasificar en:

- **Agua libre o agua congelable**, compuesta por el agua superficial, de hinchamiento y la condensada en capilares, la cual es eliminable por deshidratación y es capaz de sostener crecimiento microbiológico y servir de vehículo o participar en reacciones químicas y bioquímicas dentro de alimento. Ésta es la que congela principalmente en los procesos de congelación.
- **Agua ligada o agua no congelable**, compuesta por el agua absorbida físicamente y ligada químicamente en el alimento, absorbida por sitios activos de moléculas como las proteínas, los aminoácidos, las sales y los azúcares. No sostiene crecimiento microbiológico ni participa en reacciones bioquímicas. Ésta no congela totalmente, aun a temperaturas bajas como  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , no se elimina por los métodos convencionales de deshidratación y comprende entre 5 y 15% del agua total.

La congelación es uno de los tratamientos que menos modificaciones produce en los alimentos, ya que después de la descongelación son casi idénticos a los productos crudos empleados como materia prima (Umaña, 2007). Sin embargo es importante señalar que la congelación causa craqueo en algunas de las paredes celulares debido a las tensiones internas en el tejido causadas por el cambio de fase de agua a hielo (Alvarez y Canet, 1997).

El proceso de congelación en frutas y vegetales tiene un efecto irreversible sobre la estructura del tejido, que se manifiesta en la textura del producto y tiene como consecuencia el cambio en el volumen del producto debido a la formación de los cristales de hielo. La susceptibilidad de cada producto al daño mecánico producido por la congelación depende de la estructura celular del producto, el cual es alterado por la migración de las moléculas de agua de su ubicación normal a los sitios de cristalización. El resultado de ello es un incremento en la tensión interna, dando lugar a la separación, colapso y ruptura de las paredes celulares.

Durante la congelación, el tejido es afectado por las tensiones mecánicas internas propiciadas por el incremento de volumen, que es resultante del cambio de estado de líquido a sólido y a los gradientes de temperatura entre la superficie y el centro térmico del producto. Aunque la expansión causada por la congelación del agua está parcialmente ocupada por espacios intracelulares, los tejidos están sujetos a fuertes presiones mecánicas en el proceso de formación de los cristales. Una de las principales limitaciones de la velocidad rápida de congelación es la rigidez en la superficie del producto, evitando un incremento de volumen durante la congelación. Esto construye presiones dentro del producto, haciéndolo más propenso a agrietarse (Alvarez y Canet, 1997).

### **1.2.1. Mecanismo del proceso de congelación**

La temperatura de congelación de elección a nivel internacional es de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  /  $0\text{ }^{\circ}\text{F}$ , ya que por debajo de ésta se estima que no es posible la proliferación significativa de bacterias (Umaña, 2007). Durante el proceso de congelación ocurre la cristalización de las moléculas de agua, y los fenómenos que tienen lugar en la cristalización son de importancia práctica en la congelación de alimentos, ya que ello incide sobre factores organolépticos y de calidad, en especial sobre la textura y la capacidad de retención de agua de los tejidos (Barreiro y Sandoval, 2006).



La congelación de los tejidos se inicia por la cristalización del agua en los espacios extracelulares puesto que la concentración de solutos es menor que en los espacios intracelulares. Una vez comienza el agua a congelar, la cristalización es función de la velocidad de enfriamiento y de la velocidad de difusión del agua a partir de las disoluciones que bañan la superficie de los cristales de hielo (Umaña, 2007).

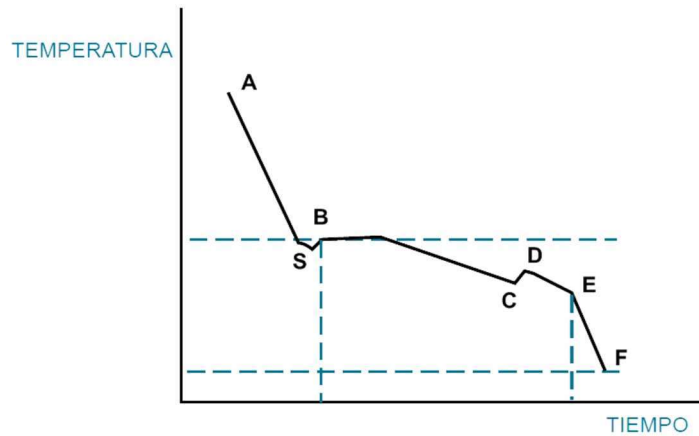
### 1.2.2. Curva de congelación

El tamaño y la estructura de los cristales de hielo dependen de la velocidad de enfriamiento utilizada y del grado de sub-enfriamiento del sistema. A la evolución de la temperatura con el tiempo durante la congelación se le denomina curva de congelación (Umaña, 2007; Orrego, 2008), como se muestra en la Figura 1.4.

Dicha curva presenta las siguientes secciones:

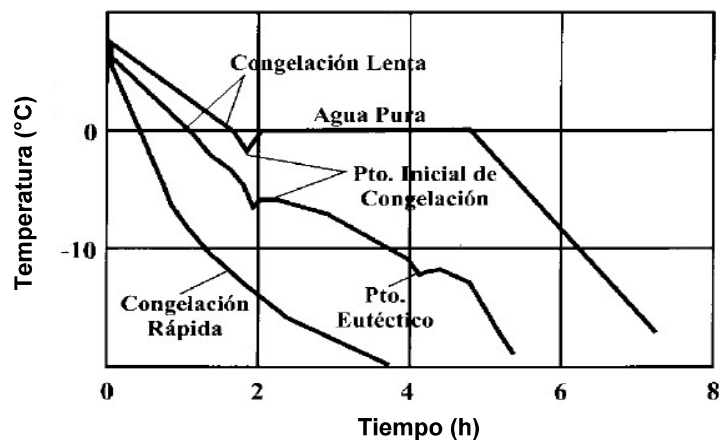
- **AS:** el alimento se enfría por debajo de su punto de congelación inferior a 0 °C, donde en el punto S que pertenece a una temperatura inferior al punto de congelación, el agua permanece en estado líquido.
- **SB:** la temperatura aumenta rápidamente hasta alcanzar el punto de congelación, pues al formarse los cristales de hielo se libera el calor latente de congelación a una velocidad superior a la que este se extrae del alimento.
- **BC:** el calor se elimina a la misma velocidad que en las fases anteriores, eliminándose el calor latente con la formación de hielo, permaneciendo la temperatura prácticamente constante. El incremento de la concentración de solutos en la fracción de agua no congelada provoca el descenso del punto de congelación, por lo que la temperatura disminuye ligeramente. Esta fase es en la que se forma la mayor cantidad de cristales.
- **CD:** uno de los solutos alcanza la sobresaturación y cristaliza. La liberación de calor latente correspondiente provoca el aumento de la temperatura hasta la temperatura del soluto.

- **DE:** la cristalización del agua y de los solutos continúa.
- **EF:** la temperatura de la mezcla de agua y hielo desciende.



**Figura 1.4** Curva de congelación del agua (Umaña, 2007).

La curva de congelación de los alimentos es diferente a la curva de congelación de las soluciones simples, pues presentan una gran diferencia respecto a la velocidad con la que se realiza la congelación (Umaña, 2007), como se muestra en la Figura 1.5.



**Figura 1.5** Visión esquemática de los procesos de congelación de una sustancia pura (agua) y de un alimento (a dos velocidades de congelación) (Orrego, 2008).

### 1.2.3. Cristalización de agua

La formación de hielo durante la cristalización se puede describir en tres etapas:

**Nucleación:** es el proceso que antecede a la cristalización; en él aparecen los núcleos de hielo como consecuencia del sub-enfriamiento. Se reconocen tres clases de nucleaciones: homogénea, heterogénea y secundaria.

**Propagación:** es el crecimiento cristalino, el cual requiere que las moléculas puedan difundirse hasta la superficie de los núcleos cristalinos crecientes. La presencia de pocas cantidades de impurezas disminuye el índice de la propagación.

**Maduración o recristalización:** son los cambios en el número, el tamaño, la forma, la orientación o la perfección de cristales después de finalizada la solidificación inicial. En la recristalización, con el paso del tiempo, el promedio de tamaño de los cristales de hielo aumenta y su número disminuye por efecto de la redistribución del agua desde los pequeños cristales de hielo hacia los grandes (Orrego, 2008).

### 1.2.4. Velocidad de congelación

La velocidad con que se produce la congelación afecta directamente la calidad de los alimentos, puesto que de ella depende el tamaño de los cristales y el daño que genere a las células por el crecimiento de los mismos (Umaña, 2007; Orrego, 2008). La cristalización del agua se clasifica en lenta y rápida.

#### 1.2.4.1. Congelación lenta

La congelación lenta o congelación convencional se lleva a cabo hasta temperaturas de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Aguilar, 2012). En ella se generan pocos cristales de hielo mayormente extracelulares, con estructuras cristalinas grandes y en forma de aguja. Dichos

cristales favorecen una transferencia neta de agua, incrementando así el agua extracelular a expensas del agua intracelular, lo cual provoca daños físicos al tejido, desnaturalización proteica por el efecto salino y reducción de la capacidad de retención de agua en el tejido (Barreiro y Sandoval, 2006). En la Figura 1.6 se observa la migración del agua intracelular como efecto de la velocidad lenta de congelación.



**Figura 1.6** Migración de agua intracelular en congelación lenta (Barreiro y Sandoval, 2006).

#### 1.2.4.2. Congelación rápida

El proceso de congelación rápida o ultracongelación se lleva a cabo con temperaturas inferiores a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Aguilar, 2012). En la congelación a velocidades rápidas y ultra rápidas se forman un gran número de cristales de hielo con estructuras esféricas transparentes y de menor tamaño, tanto intra como extracelulares, con menor transferencia del agua desde el interior hasta el exterior de la célula, menor desnaturalización proteica, menores daños físicos celulares y mayor capacidad de retención de agua en el tejido (Barreiro y Sandoval, 2006). En la Figura 1.7 se observa la migración reducida del agua intracelular por efecto osmótico en la congelación rápida.

La textura resultante en la congelación rápida es en consecuencia mejor que en la lenta, debido a que el tejido es menos afectado por el proceso y tiene mayor parecido con el existente antes del proceso de congelación (Barreiro y Sandoval, 2006).



**Figura 1.7** Migración de agua intracelular en congelación rápida (Barreiros y Sandoval, 2006).

### 1.3. Descongelación

Durante el proceso de descongelación, al suministrar energía al alimento, ocurre el proceso contrario: primero se funde el agua extracelular y por efectos osmóticos, ésta es transferida hacia dentro de la célula, donde se encontrarán las soluciones más concentradas en sales naturales. Si el alimento fue congelado en forma lenta, habrá una fracción importante de proteínas desnaturalizadas y daños celulares, con una capacidad de retener agua del tejido reducida, es decir, una parte del agua líquida formada en la descongelación no será retenida por el tejido y se generará el fenómeno de la sinéresis o pérdida del fluido durante la descongelación. Si la congelación fue rápida, el agua extracelular será menor y la capacidad de retención de humedad del tejido mayor, por lo cual la sinéresis será necesariamente menor.

La sinéresis es afectada por la velocidad de descongelación, si ésta última es lenta habrá tiempo suficiente para que ocurra el fenómeno osmótico y la reabsorción de agua hacia el interior de la célula, reduciéndose así la pérdida del fluido; si es rápida, no hay tiempo para que este proceso ocurra y las pérdidas de fluido se incrementarán y con ello la pérdida de nutrientes hidrosolubles y de peso, así como un efecto drástico en la textura del producto, ya que al perderse humedad cambian las propiedades organolépticas del alimento (Barreiro y Sandoval, 2006).

Durante la descongelación, las células son incapaces de recuperar su forma y turgencia originales, el alimento se reblandece y el material celular se pierde por goteo. La expulsión de una parte del contenido celular puede provocar el contacto entre enzimas y sus sustratos que en ocasiones se encuentran en compartimentos separados. Este es el caso, por ejemplo, de la polifenoloxidasa y los polifenoles responsables de oxidaciones enzimáticas en alimentos no escaldados previamente, provocan una aceleración del pardeamiento enzimático durante la descongelación e incluso durante el almacenamiento (Umaña, 2007).

#### **1.4. Propiedades fisicoquímicas en alimentos**

La conservación de alimentos se puede definir como la aplicación de tecnologías para prolongar la vida útil de los alimentos para el consumo humano y animal, de manera que sean protegidos de microorganismos patógenos y agentes responsables de su deterioro (Aguilar, 2012).

Los procesos que favorecen dicha conservación, transforman las propiedades fisicoquímicas de los alimentos que influyen en los parámetros de calidad del producto final, los cuales, tienen relevancia para que los alimentos sean consumibles y aceptados comercialmente. Motivo por el que es necesario estudiar y evaluar dichas propiedades para mejorar la calidad de los productos y que éstos posean los atributos más semejantes a los del alimento fresco.

##### **1.4.1. Humedad (X)**

El contenido de humedad expresa la cantidad de agua presente en una muestra húmeda. Existen dos bases ampliamente utilizadas para expresar la humedad: el contenido de humedad en base húmeda, que es la cantidad de agua por unidad de masa de muestra húmeda; y el contenido de humedad en base seca, que es la

cantidad de agua por unidad de masa de sólidos secos presentes en la muestra. (Singh y Heldman, 2009).

Existe una relación entre el contenido de agua en los alimentos y su vida útil. Los procesos de deshidratación y concentración son conducidos primordialmente con el propósito de disminuir el contenido de agua del alimento, y así incrementar la concentración de los solutos y disminuir su descomposición (Fennema, 1996).

#### **1.4.2. Actividad de agua ( $a_w$ )**

Se ha observado que diferentes clases de alimentos con la misma cantidad de agua difieren significativamente en su vida de anaquel. De esta manera el contenido de agua no es un parámetro confiable para predecir la estabilidad y vida útil del alimento, por lo que se emplea el término de actividad de agua,  $a_w$ , como indicador eficaz, ya que está relacionada con la velocidad de crecimiento microbiano y con las reacciones que degradan el alimento.

La actividad de agua, es la propiedad intrínseca de los alimentos que cuantifica la disponibilidad o movilidad del agua libre para intervenir en el crecimiento de los microorganismos, las reacciones químicas y enzimáticas, la interacción con los constituyentes no acuosos, el control de los procesos de deshidratación y rehidratación, la migración de la humedad en el almacenamiento, entre otros factores. Se relaciona de manera no lineal con el contenido de humedad mediante las curvas e isothermas de adsorción y desorción; y sus valores varían desde 1.0 para el agua pura, y hasta cero para un producto totalmente seco, por lo que mientras más alta sea la actividad de agua y se acerque a 1.0, mayor será la inestabilidad del producto (Fennema, 1996; Badui, 2006).

Se puede expresar de la siguiente manera, en la ecuación 1.1:

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

Dónde:

$p$  = presión de vapor del agua del alimento (Pa; mmHg; torr)

$p_o$  = presión de vapor del agua pura (Pa; mmHg; torr).

$p/p_o$  = presión de vapor relativa (Pa; mmHg; torr).

$HR$  = Humedad relativa de equilibrio (%).

Se establece que la actividad de agua es la presión de vapor de las moléculas de agua en el espacio de cabeza en un recipiente cerrado, comparada con la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura, después de alcanzar el equilibrio. En otras palabras la actividad de agua es aproximadamente proporcional a la presión de vapor relativa según la ecuación 1.1 (Fennema, 1996; Badui, 2006).

La presión relativa de vapor es dependiente de la temperatura. Existen gráficos que evidencian que la relación del  $\ln a_w$  vs  $1/T$  (como contenido de agua constante) puede ser lineal, al igual que el  $\ln p/p_o$  vs  $1/T$ . Donde es evidente que el grado de dependencia de la temperatura es una función del contenido de humedad. Sin embargo, existen gráficos de  $\ln p/p_o$  vs  $1/T$  que no siempre tienen un comportamiento lineal en amplios intervalos de temperatura, y son generalmente exhibidos en las partes donde se inicia la formación de cristales de hielo.

Es apropiado considerar la definición de la presión de vapor relativa aplicada a las temperaturas de congelación, ya que el término del denominador ( $p_o$ ) pasa a ser equivalente a la presión de vapor de agua superenfriada, debido a que los valores de la presión de vapor de agua superenfriada pueden exactamente ser comparados con los valores de la presión de vapor relativa a temperaturas superiores al punto de congelación. Por lo que en el término del numerador, la presión parcial del agua en



alimentos congelados es igual a la presión de vapor del hielo a la misma temperatura, considerándolo en la ecuación 1.2:

$$a_w = \frac{p_{ff}}{p_{o(SCW)}} = \frac{p_{ice}}{p_{o(SCW)}} \quad (1.2)$$

Dónde:

$p_{ff}$  = Presión parcial del agua en alimentos parcialmente congelados.

$p_{o(SCW)}$  = Presión de vapor del agua pura superenfriada.

$p_{ice}$  = Presión de vapor del hielo puro.

En la Tabla 1.3 se presentan valores de la presión de vapor relativa calculados a partir de presiones de vapor de hielo y presiones de vapor de agua superenfriada, siendo estos valores los correspondientes a los alimentos congelados a la misma temperatura.

En la Figura 1.8 se muestra la gráfica de  $\log p/p_o$  vs  $1/T$ , ilustrando la relación lineal de las temperaturas de congelación. La influencia de la temperatura sobre la presión de vapor relativa es mayor en las temperaturas de congelación que en las temperaturas superiores del punto de congelación. De tal modo es importante remarcar que la presión de vapor relativa en las temperaturas de congelación se vuelve independiente de la composición y depende únicamente de la temperatura.

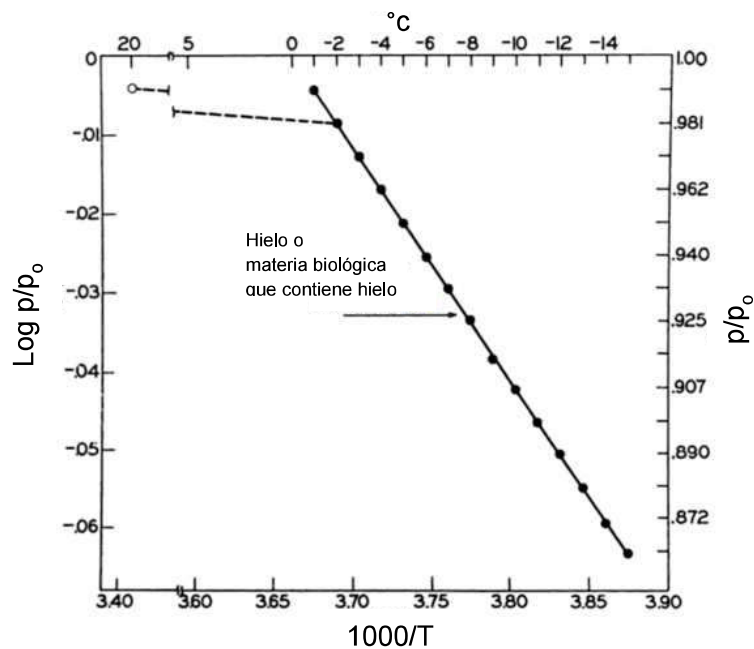
Si se sigue el conocimiento de la presión de vapor relativa a temperaturas de congelación, este no puede ser usado para predecir la presión de vapor relativa en temperaturas por encima del punto de congelación. Por ejemplo, en un producto a  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  ( $p/p_o = 0.86$ ), los microorganismos no son capaces de crecer y las reacciones químicas ocurrirán muy lentamente. Sin embargo, a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  y con un  $p/p_o = 0.86$  algunas reacciones químicas ocurrirán rápidamente y algunos microorganismos crecerán a una velocidad moderada (Fennema, 1996).

**Tabla 1.3** Presiones de vapor y relación de presiones de vapor de agua y hielo (Fennema, 1996).

Temperatura (°C)	Presión de vapor				
	Agua líquida <sup>a</sup>		Hielo <sup>b</sup> o hielo contenido en alimentos		$(p_{ice}/p_{water})$
	(Pa)	(torr)	(Pa)	(torr)	
0	611 <sup>b</sup>	4.58	611	4.58	1.00
-5	421	3.16	402	3.02	0.95
-10	287	2.15	260	1.95	0.91
-15	191	1.43	165	1.24	0.86
-20	125	0.94	103	0.77	0.82
-25	80.7	0.61	63	0.47	0.78
-30	50.9	0.38	38	0.29	0.75
-40	18.9	0.14	13	0.098	0.69
-50	6.4	0.05	3.9	0.029	0.61

<sup>a</sup> Superenfriada a todas las temperaturas excepto 0 °C. Datos observados por encima de -15 °C y calculados por debajo de 15 °C (Mason, 1957).

<sup>b</sup> Datos observados por Lide (1993).

**Figura 1.8** Relación entre la presión relativa de vapor y la temperatura para un alimento complejo por encima y por debajo del punto de congelación (Fennema, 1996).

La actividad de agua puede ser predicha mediante gráficos de actividad de agua vs contenido de humedad (isotermas de sorción de humedad). Sin embargo, la medición de la actividad de agua en la superficie de los alimentos durante la congelación es difícil de realizar debido a que esta propiedad varía con el tiempo, pero puede ser estimada por modelos de sorción (Hamdami *et al.*, 2004).

### **1.4.3. Agua congelable ( $X_{con}$ )**

El agua ligada es aquella porción que no congela a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que también se le llama agua no congelable (Badui, 2006). Por otra parte el agua libre está compuesta por el agua superficial, de hinchamiento y la condensada en capilares, la cual se congela primordialmente en los procesos de congelación, por lo cual también es llamada agua congelable.

Las propiedades termofísicas de los alimentos congelados dependen fuertemente de la fracción de hielo que esté presente en el alimento, y es necesario determinar la fracción másica de agua que se ha cristalizado.

Puede considerarse que los alimentos están constituidos por agua, sustancias solubles y sustancias insolubles. Bajo el punto inicial de congelación, los alimentos contienen hielo, agua no congelada, sólidos solubles y sólidos insolubles. A medida que la temperatura disminuye existe un incremento en la fracción másica de hielo, y un decremento en la fracción másica de agua no congelada (Fricke y Becker, 2001), por lo que es de esperarse que, mientras mayor sea el cambio de agua libre a una condición más estable en el proceso de congelación, mayor será la conservación de la calidad del alimento, sin ser necesario la reducción de la temperatura del alimento a niveles más bajos, los cuales no serían efectivos para congelar el agua ligada y sólo resultaría en desperdicio de energía y productividad (Barreiro y Sandoval, 2006).

La fase no congelable es diferente al resto del alimento, por lo que a pesar de la baja temperatura, pueden ocurrir algunas reacciones químicas (Badui, 2006).

#### **1.4.4. Incremento de volumen ( $V_{in}$ )**

La estabilidad y las propiedades de las macromoléculas dentro de las células de los alimentos depende de la interacción de sus grupos reactivos con la fase acuosa que los rodea (Badui, 2006). Los alimentos al ser congelados tienden a aumentar su volumen porque la densidad del agua congelada disminuye, este fenómeno depende de la humedad y composición del alimento, y mientras más humedad posea el alimento más apreciable será su cambio de volumen (Barreiro y Sandoval, 2006), por lo cual el congelamiento provoca un aumento de 8-10% del volumen en el alimento, alterando las interacciones mencionadas y los cristales de hielo modifican la textura en frutas, hortalizas y cárnicos (Badui, 2006). El incremento de volumen de agua pura es de 9% a 0 °C (Alvarez y Canet, 1997).

#### **1.4.5. Color (L, a y b)**

El color es una propiedad física que determina la aceptación de los alimentos por los consumidores, es evaluado mediante la absorción selectiva de diferentes cantidades de longitud de onda dentro de la región visible (Serpil y Servet, 2006). Se le define como una respuesta mental al estímulo que una radiación luminosa visible produce en la retina. Dicha respuesta se ve afectada por el objeto, el observador, el iluminante, la geometría óptica, el área, fondo, superficie, brillo y temperatura (Delmoro *et al.*, 2010).

El color es un atributo de la apariencia de los productos y su análisis tiene múltiples aplicaciones en la industria, pues su observación permite detectar ciertas anomalías y defectos que influyen de manera rigurosa en la aceptabilidad del producto por el consumidor.

Diversas industrias miden el color de sus productos: la industria del papel, la textil, de colorantes y pinturas, construcción, automóviles, medicamentos y alimentos. En la

industria alimentaria las medidas colorimétricas son necesarias para evaluar objetivos relacionados con la calidad del producto, tanto en las etapas de producción como en su comercialización y consumo. Indirectamente, también se pueden medir otros parámetros responsables de las características cromáticas finales del alimento, que afectan en relación directa a los equilibrios químicos del producto, como la capacidad de retención de agua en las carnes, cenizas en harinas, oxidación o degradación de un producto, entre otros factores.

La aplicación de la teoría tricromática al estudio del color de los alimentos proporciona una caracterización cromática mediante la metodología recomendada por organizaciones como la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) (Delmoro *et al.*, 2010; Laboratorio de color y calidad de los alimentos, 2014).

Un procedimiento fundamental para medir el color es el método instrumental, que consiste en el uso de técnicas en las que se mide la reflectancia o transmitancia de la muestra. Se utilizan instrumentos conocidos como espectrofotómetros o colorímetros triestímulos (Delmoro *et al.*, 2010), con sistemas capaces de describir los colores. Los sistemas de orden de color son arreglos tridimensionales de color de acuerdo a la apariencia y existen cinco utilizados para análisis de alimentos: Munsell, CIE, CIE  $L^*a^*b^*$  (CIELAB), Hunter Lab y Lovibond (Serpil y Servet, 2006).

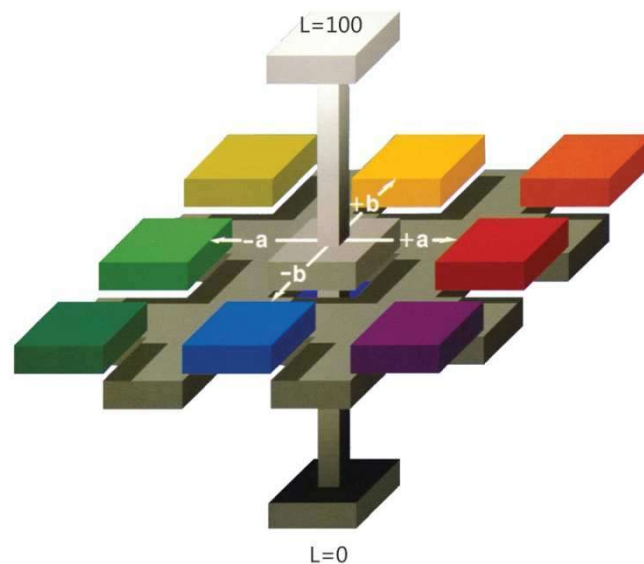
Los valores triestímulo con los cuales la CIE define los diferentes sistemas colorimétricos son los espacios de color y los parámetros psicofísicos. Éstos últimos son: el tono, que es la gradación entre colores que permite clasificarlos como rojo, amarillo, verde o azul; la luminosidad, que es la dimensión mediante la cual el objeto refleja la luz incidente en menor o mayor medida; y la saturación, que es el grado de diferencia a partir de un gris neutro para un color que tiene la misma luminosidad (Laboratorio de color y calidad de los alimentos, 2014; A&E, 2009).

La escala de color Hunterlab (Figura 1.9) evolucionó de 1950 a 1960, basada en la teoría de los colores opuestos. Esta teoría asume que los receptores en el ojo

humano perciben el color como los pares de colores opuestos que se describen a continuación.

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

La escala **L** representa la luminosidad y la escala **a** y **b** representan la cromaticidad. Se requieren los tres valores para describir completamente el color de un objeto (Hunterlab, 2012). El espacio de color tridimensional **L, a, b**, es el siguiente:



**Figura 1.9** Escala de colores opuestos **L, a, b** (Hunterlab, 2012).

## **1.5. Propiedades térmicas en alimentos**

Los procesos de elaboración y conservación de alimentos implican la transferencia de calor en sus etapas, por lo que es necesario el conocimiento de las propiedades térmicas de los alimentos para el diseño e ingeniería tanto de los procesos de calentamiento y enfriamiento de los mismos, como de los equipos en donde se llevan a cabo (Serpil y Servet, 2006).

Las propiedades térmicas de los alimentos son fuertemente dependientes de la composición química y la temperatura, y debido a que hay una multitud de productos alimenticios disponibles es difícil generar una determinada base de datos experimental de propiedades térmicas para todas las posibles condiciones y composiciones de los alimentos, por lo que la opción más viable es la predicción de las propiedades térmicas de los alimentos usando modelos matemáticos que consideren los efectos de la composición química y la temperatura (Fricke y Becker, 2001).

En general, las propiedades termofísicas de los alimentos son bien representadas cuando la temperatura es mayor al punto de congelación. Sin embargo, por debajo del punto de congelación inicial, las propiedades termofísicas de los alimentos varían en gran medida debido al complejo proceso que se involucra durante la congelación, y éstas dependen fuertemente de la fracción de hielo presente en los mismos, por lo que es necesario determinar la fracción másica del agua que se ha cristalizado en el alimento (Fricke y Becker, 2001).

### **1.5.1. Conductividad térmica (k)**

La conductividad térmica,  $k$ , es la habilidad de un material para conducir el calor, en los sólidos como los alimentos, depende de la temperatura, composición, porosidad del material, así como de factores que afectan las trayectorias de flujo de calor a

través del material, como la fracción de poros, forma, tamaño y disposición de los espacios vacíos, el fluido contenido en los poros y la homogeneidad. Tiene la unidad de  $W/m K$  en el Sistema Internacional.

La conductividad térmica incrementa con el contenido de humedad, y varía entre la del agua,  $k_{agua} = 0.614 W/m \text{ } ^\circ C$  a  $27 \text{ } ^\circ C$ , y la del aire,  $k_{aire} = 0.026 W/m \text{ } ^\circ C$  a  $27 \text{ } ^\circ C$ , que son el mayor y menor componente conductor en los alimentos, respectivamente (Serpil y Servet, 2006).

La conductividad térmica del hielo al ser casi cuatro veces mayor que la del agua,  $k_{hielo} = 2.24 W/m \text{ } ^\circ C$  a  $0 \text{ } ^\circ C$ , explica la diferencia en las tasas de congelación y descongelación de los alimentos. Durante la congelación, la capa exterior está en el estado congelado y el hielo se propaga hacia el centro sustituyendo al agua por un mejor conductor. El calor es conducido a través de la capa de hielo, que tiene una mayor conductividad térmica que la del agua. Sin embargo, en la descongelación, la parte congelada está en el centro y el calor es conducido a través de la región descongelada, que tiene una conductividad térmica más baja y una mayor resistencia que la de la capa de hielo. Como resultado, el proceso de descongelación es más lento que el proceso de congelación (Serpil y Servet, 2006).

### **1.5.2. Calor específico ( $C_p$ )**

El calor específico a presión constante,  $C_p$ , que se emplea para la mayoría de las aplicaciones de calentamiento o enfriamiento de los alimentos (Serpil y Servet, 2006), es la cantidad de energía, en forma de calor, que gana o pierde un sistema por unidad de masa, para que se produzca en él un cambio de temperatura de un grado, sin que haya cambio de estado (Orrego, 2003). Existen ecuaciones que expresan el calor específico como función de la composición o de la temperatura. Su unidad es  $J/kg K$  en el Sistema Internacional. Éste depende en gran medida de la composición del alimento, para obtenerlo es necesario conocer el calor específico de



cada componente de la mezcla, que es usualmente suficiente para predecir el calor específico de la misma. Dicha propiedad no puede estar tan lejano del calor específico del agua, debido a que ésta es el mayor componente de los alimentos (Serpil y Servet, 2006).

Para alimentos congelados, existe un gran decremento en la capacidad de calor específico conforme la temperatura va disminuyendo (Fricke y Becker, 2001). La razón para los valores más bajos del  $C_p$  en el proceso de congelación, es porque el calor específico del hielo es cerca de la mitad que el del agua líquida. Esto en parte explica el mayor tiempo de descongelación de los alimentos comparado con el tiempo de congelación de los mismos (Serpil y Servet, 2006).

En alimentos no congelados, el calor específico es relativamente constante respecto a la temperatura. Sin embargo, para alimentos congelados existe un gran decremento en el calor específico cuando la temperatura disminuye. El calor específico de un alimento a temperaturas arriba del punto inicial de congelación es obtenido a partir de la sumatoria del calor específico de cada uno de los componentes del alimento. Por debajo del punto de congelación el calor sensible debido al cambio de temperatura y el calor latente debido a la fusión del agua son importantes. El calor latente es liberado durante un intervalo de temperatura, y el calor específico aparente puede ser usado para tener en cuenta los efectos tanto del calor sensible como del calor latente (Fricke y Becker, 2001).

## **1.6. Diseño de experimentos**

El diseño experimental forma parte del proceso científico y es una de las formas en que se conoce cómo funcionan los sistemas o procesos. Este involucra una serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados a las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

Los diseños de experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto de éstos sobre una respuesta son denominados factoriales, y estudian todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo. Además, de que son útiles en las primeras fases del trabajo experimental, cuando es probable que haya muchos factores por investigar.

Pueden existir dos tipos de factores: el factor cuantitativo, en el que sus niveles pueden ser asociados con puntos sobre una escala numérica; y el factor cualitativo, que es aquel cuyos niveles no pueden ser organizados en orden de magnitud. Ambos tipos de factores son tratados de manera idéntica en cuanto al diseño inicial y al análisis del experimento. El interés del experimentador radica en determinar las diferencias, si existen, entre los niveles del factor.

Los diseños factoriales son más eficientes que los experimentos de un factor a la vez, evitan llegar a conclusiones incorrectas si se presentan interacciones, y permiten estimar los efectos de los factores produciendo conclusiones válidas en el intervalo de condiciones experimentales (Montgomery, 2012).

### **1.6.1. Modelos mixtos**

Son diseños factoriales que pueden ser considerados una combinación del factor de efectos fijos y el factor de efectos aleatorios, se denomina también modelo mixto de análisis de varianza. Éste permite estudiar los efectos de todos los niveles de las variables aleatorias en cada grupo de las variables fijas. El estudio de este efecto aporta información que no se podría obtener con los modelos de efectos fijos y modelos de efectos aleatorios por separado (Montgomery, 2012).

### **1.7. Estudios realizados sobre la papa**

Della Rocca y Mascheroni (2011) llevaron a cabo la deshidratación de papa por métodos combinados de secado, los cuales fueron deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente. El resultado presentado fue que la deshidratación osmótica como pretratamiento antes del secado combinado contribuyó a impedir el deterioro de la estructura y la pérdida de aromas y sabores.

Lozano-Acevedo *et al.* (2011) efectuaron un análisis acerca de la influencia de diferentes pretratamientos y condiciones de secado sobre las características físicas de finas rodajas de papa mediante el deshidratado por lecho fluidizado. Donde se obtuvo como conclusión que la temperatura y el incremento en la adición de ácido cítrico disminuyen el contenido de humedad y actividad de agua, evitando el pardeamiento enzimático.

Ramírez-Navas *et al.* (2011) analizaron el secado de rodajas de papa por criodesecación atmosférica (CDA) empleando un desecante, al realizar diferentes pretratamientos, obtuvieron los menores tiempos de secado utilizando  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  y  $\text{CaCl}_2$ .

Lewicki y Pawlak (2005) evaluaron el efecto del modo de secado sobre la microestructura de la papa mediante secado convectivo, secado por explosión y liofilización. Encontraron que el secado por explosión daña menos el tejido que el secado por convección, y que el secado por congelación fue el más devastador para la microestructura del tejido, ya que fue por liofilización.

### **1.8. Aplicación de congelación a la papa**

Della Rocca *et al.* (2013) realizaron el proceso de congelación de papas frescas y pretratadas por: deshidratación osmótica, por escaldado y posterior microondas, y deshidratación osmótica seguida de microondas. Obteniendo como resultado que las

papas pretratadas por deshidratación osmótica y microondas exhibieron un tiempo de congelación de 10 minutos, el cual fue 9 minutos inferior al de las papas frescas. El proceso de deshidratación osmótica presentó un tiempo de 16 minutos y el proceso de escaldado y microondas un tiempo de congelación de 12 minutos.

Cuibus *et al.* (2013) monitorearon la temperatura de la superficie de la papa durante el proceso de congelación a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  mediante termografía infrarroja y determinaron el potencial químico del agua y los cambios de la estructura del alimento durante el proceso, en orden de determinar la movilidad del agua a lo largo de la congelación. Volumen, humedad y actividad de agua fueron medidos antes y después del proceso. Encontraron relaciones importantes entre el flujo de calor, los gradientes de potencial químico del agua y cambios estructurales, y demostraron que el proceso de congelación comienza en áreas con alta actividad de agua generando núcleos de cristalización que causan un incremento en la tensión superficial de alimento y producen un incremento de volumen.

Carbonell *et al.* (2006) analizaron la textura de la papa después de un proceso de congelación y descongelación con diferentes velocidades de congelación y diferentes pretratamientos esperando encontrar la mejor estrategia para preservar las características de textura de la papa antes de ser congelada. Se probaron diez condiciones de escaldado y un proceso de escaldado de dos pasos. Se obtuvo como resultado que la combinación del proceso de escaldado de dos pasos con cloruro de calcio y con una velocidad de congelación rápida (congelación por inmersión) conservó mejor la textura a un nivel macro y micro estructural.

Alvarez *et al.* (1999) usaron la metodología de superficie de respuesta con un diseño de composición central rotatable, Box-Behnken, para determinar las condiciones óptimas del proceso de congelación sobre la actividad de la pectinesterasa (PE), parámetros reológicos y propiedades de textura en los tejidos de la papa, empleando un proceso de escaldado de dos pasos, y un proceso de congelación mediante vapor de nitrógeno líquido. Obteniendo como resultado una alta correlación en el

incremento de la pectinesterasa y la firmeza del tejido en las condiciones de congelación, probando que dicha enzima es un principal contribuyente en la firmeza que determina la calidad de la textura en el tejido de la papa congelada.

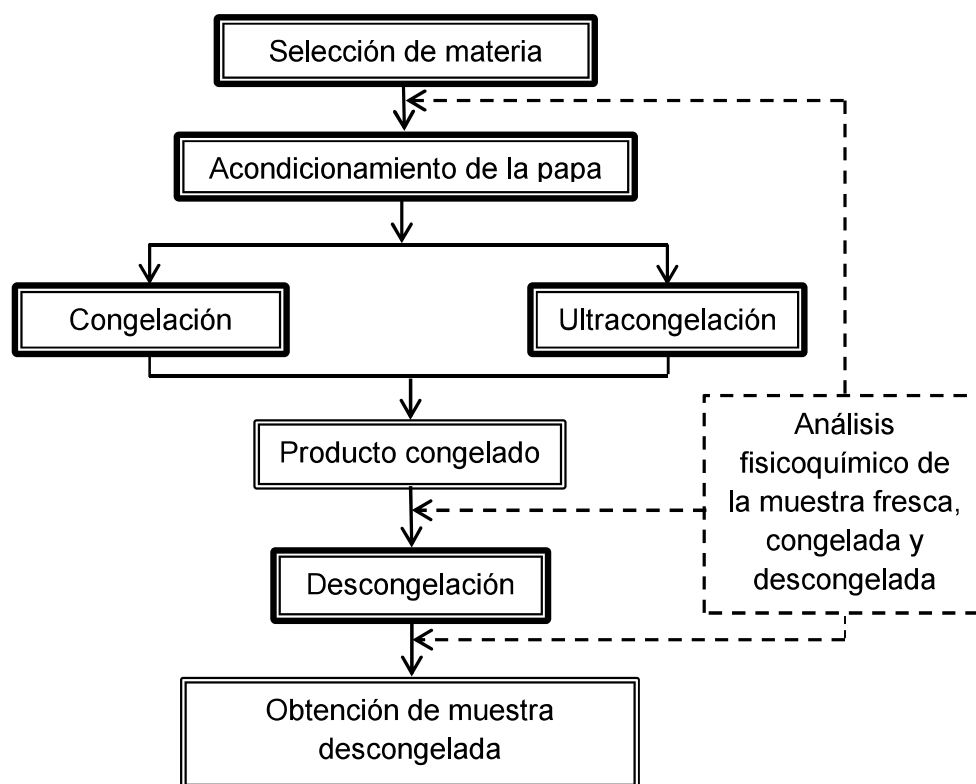
Alvarez y Canet (1997) reportaron el efecto de diferentes velocidades de congelación (0.5, 1.15 y 2 °C/min) y un pre enfriamiento (3 °C por 30 min) sobre la resistencia mecánica de los tejidos de la papa (*Solanum tuberosum*) en un intervalo de temperatura de -3 °C a -18 °C, observando que el comportamiento reológico del tejido está directamente relacionado con el grado del daño estructural, encontrando que el pre enfriamiento reduce el cambio volumétrico y el craqueo estático de las muestras. El pre enfriamiento redujo el craqueo de muestras de manera más significativa en la velocidad de congelación de 2 °C/min. También se observó que no hay craqueo cerca del punto de congelación, ya que al llegar el centro térmico a congelarse existe menos agua disponible para congelar y el craqueo se ralentiza.

**CAPÍTULO 2**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Metodología general

Para lograr el objetivo general de este proyecto de tesis, se estudiaron los efectos de las condiciones de congelación sobre la papa (*Solanum tuberosum*) mediante dos procedimientos: congelación y ultracongelación. En la Figura 2.1 se muestra la metodología general que se utilizó para la realización de esta investigación. Consiste básicamente en cuatro etapas: selección de la materia prima, acondicionamiento, congelación o ultracongelación, y descongelación.



**Figura 2.1** Metodología general aplicada para el proceso de congelación y ultracongelación de la papa.

Se evaluó la calidad de la papa congelada en base a sus propiedades físico-químicas (cantidad de agua congelable, incremento de volumen y color) y sus propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico).

## 2.2. Selección de la materia prima

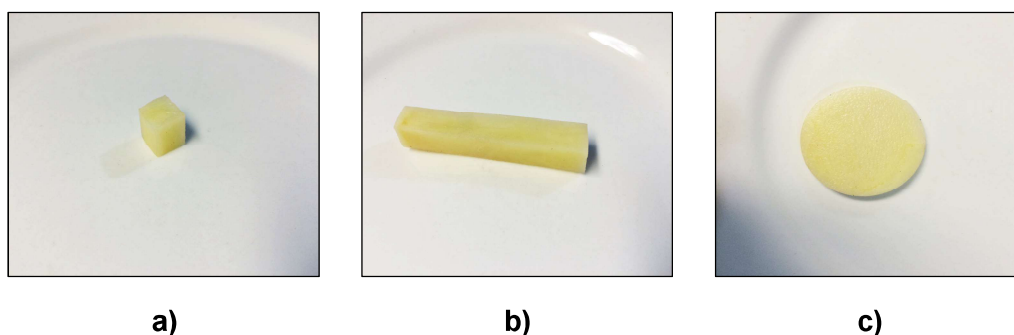
Se utilizó papa (*Solanum tuberosum*) variedad San José, proporcionada por los agricultores del municipio de La Perla, Veracruz. Las papas fueron seleccionadas de acuerdo a su tamaño (Figura 2.2), buscando que no existiera variación en las dimensiones de cada papa ( $6 \pm 0.5$  cm de diámetro) y de acuerdo a su estado de madurez, se escogieron las papas con el menor tiempo de cosecha.



**Figura 2.2** Papa (*Solanum tuberosum*) seleccionada.

## 2.3. Acondicionamiento de la muestra

La papa se lavó y cortó de tres maneras distintas: cubos (1x1x1 cm), bastones (1x1x7 cm), y hojuelas (5 cm diámetro y espesor 0.2 cm), como se muestra en la Figura 2.3. Todas las muestras fueron tratadas en solución de NaCl al 0.5% durante 10 minutos. Para aquellas muestras que requirieron pretratamiento de acuerdo al diseño experimental, se empleó una solución de NaCl al 0.5% y ácido cítrico monohidratado al 1% como agente conservador antioxidante, durante de 10 minutos.



**Figura 2.3** Formas empleadas para el estudio de la papa: a) cubos, b) bastones y c) hojuelas.



## 2.4. Proceso de congelación

Para el estudio de los procesos de congelación se consideraron dos variables cualitativas y una variable cuantitativa. Las muestras previamente acondicionadas se sometieron a congelación y ultracongelación por períodos de 180 minutos. Los equipos empleados se encuentran ubicados en el laboratorio de Bioprocesos del Instituto Tecnológico de Orizaba.

### 2.4.1. Proceso de congelación

Para el proceso de congelación se empleó un congelador convencional marca Daewoo modelo DFR-25106B que va desde los 0 °C hasta los -29 °C (Figura 2.4).



**Figura 2.4** Congelador marca Daewoo modelo DFR-25106B.

### 2.4.1.1. Diseño de experimentos

Para el proceso de congelación de la papa (*Solanum tuberosum*) se empleó un diseño experimental con niveles mixtos con una variable cuantitativa y dos variables cualitativas (Montgomery, 2012). Se manejaron dos factores con tres niveles, y un factor con dos niveles, expresando el arreglo de la siguiente forma:

$$3 \times 3 \times 2$$

Los factores empleados fueron: temperatura de congelación ( $T_c$ ), -5, -10 y -15 °C; tamaño de muestra ( $t_a$ ), cubo, bastón y hojuela; pretratamiento (Pret), S/AC y C/AC. En la Tabla 2.1 se presentan las corridas experimentales correspondientes al diseño.

**Tabla 2.1** Diseño experimental 3x3x2 aplicado al proceso de congelación.

Exp	$T_c$ (°C)	$t_a$	Pret
1	-5	Cubo	S/AC
2	-5	Cubo	C/AC
3	-5	Bastón	S/AC
4	-5	Bastón	C/AC
5	-5	Hojuela	S/AC
6	-5	Hojuela	C/AC
7	-10	Cubo	S/AC
8	-10	Cubo	C/AC
9	-10	Bastón	S/AC
10	-10	Bastón	C/AC
11	-10	Hojuela	S/AC
12	-10	Hojuela	C/AC
13	-15	Cubo	S/AC
14	-15	Cubo	C/AC
15	-15	Bastón	S/AC
16	-15	Bastón	C/AC
17	-15	Hojuela	S/AC
18	-15	Hojuela	C/AC

Las variables dependientes fueron: cantidad de agua congelable ( $X_{\text{con}}$ ); incremento de volumen ( $V_{\text{in}}$ ); color ( $L$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\Delta E$ ). Las corridas experimentales se realizaron al azar y por duplicado.

#### 2.4.2. Proceso de ultracongelación

Para el proceso de ultracongelación el equipo utilizado fue un ultracongelador vertical marca So-Low modelo U85-13 (Figura 2.5) que consta con cinco compartimientos, y un sistema de control de temperatura digital que muestra la temperatura programada y la actual, en el cual las muestras pueden ser congeladas a una temperatura que va desde  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.5** Ultracongelador marca So-Low modelo U85-13.

### 2.4.2.1. Diseño de experimentos

Para el proceso de ultracongelación de la papa (*Solanum tuberosum*) se empleó de igual manera un diseño experimental con niveles mixtos con una variable cuantitativa y dos variables cualitativas. Manejando dos factores con tres niveles, y un factor con dos niveles, representado de la siguiente forma:

$$3 \times 3 \times 2$$

Los factores empleados fueron: temperatura de ultracongelación ( $T_{uc}$ ), -40, -60 y -80 °C; tamaño de muestra ( $t_a$ ), cubo, bastón y hojuela; pretratamiento (Pret), S/AC y C/AC. En la Tabla 2.2 se presentan las corridas experimentales correspondientes al diseño.

**Tabla 2.2** Diseño experimental 3x3x2 aplicado al proceso de ultracongelación.

Exp	$T_{uc}$ (°C)	$t_a$	Pret
1	-40	Cubo	S/AC
2	-40	Cubo	C/AC
3	-40	Bastón	S/AC
4	-40	Bastón	C/AC
5	-40	Hojuela	S/AC
6	-40	Hojuela	C/AC
7	-60	Cubo	S/AC
8	-60	Cubo	C/AC
9	-60	Bastón	S/AC
10	-60	Bastón	C/AC
11	-60	Hojuela	S/AC
12	-60	Hojuela	C/AC
13	-80	Cubo	S/AC
14	-80	Cubo	C/AC
15	-80	Bastón	S/AC
16	-80	Bastón	C/AC
17	-80	Hojuela	S/AC
18	-80	Hojuela	C/AC

Las variables dependientes fueron: cantidad de agua congelable ( $X_{con}$ ); incremento de volumen ( $V_{in}$ ); color (**L**, **a**, **b**,  $\Delta E$ ). Las corridas experimentales se realizaron al azar y por duplicado.

## **2.5. Análisis fisicoquímico de la papa**

Para la caracterización de la papa fresca se realizaron análisis fisicoquímicos de proteínas, grasas, carbohidratos, cenizas, humedad, actividad de agua y los parámetros de color **L**, **a** y **b**.

Para evaluar la calidad del producto congelado se determinaron los parámetros de color **L**, **a** y **b** al final de cada tratamiento, así como la cantidad de agua congelable y el incremento de volumen a diferentes tiempos de la congelación, con el propósito de evaluar la evolución de las cinéticas de dichas variables respuesta.

### **2.5.1. Determinación de proteínas**

Para determinar el contenido proteico de la papa, se utilizó un digestor de proteínas marca NOVATECH, aplicando el método Kjeldahl para analizar el nitrógeno orgánico, en el cual las proteínas son digeridas junto con 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 se destila posteriormente en una solución de ácido bórico al 3%, finalmente los aniones del borato formado se titulan con HCl 0.1 N utilizando indicador de Toshiro, convirtiéndose en el nitrógeno de la muestra (Núñez-Galindo, 2016).

Para calcular el contenido de proteína cruda de la papa fresca se empleó la ecuación 2.1.

$$\% \text{ Proteínas} = \frac{14 \times N \times V \times 100 \times \text{factor}}{m \times 1000} \quad (2.1)$$

Dónde:

N: normalidad del HCl

V: volumen de HCl gastado (ml)

Factor: factor para proteína general (6.25)

m: masa de la muestra empleada (g)

### 2.5.2. Determinación de grasas

El contenido de grasas en la papa fresca se determinó por el método de extracción con el equipo Soxhelt respecto a la norma NMX-F-089-S-1978. La ecuación 2.2 se empleó para determinar el porcentaje de grasas en el alimento.

$$\% \text{ Grasas} = \frac{\text{g del matraz con grasa} - \text{g del matraz tarado}}{\text{g muestra}} (100) \quad (2.2)$$

### 2.5.3. Determinación de carbohidratos

El contenido de carbohidratos fue determinado “por diferencia”, donde se realizó la sustracción de los porcentajes del agua, grasa, proteínas y cenizas a 100%, obteniendo el porcentaje de los carbohidratos. La cantidad de carbohidratos calculados mediante este método no sólo contiene azúcares y almidones, sino también carbohidratos no disponibles o fibra dietética (Finglas *et al.*, 2015). Dicho método ha sido empleado por Miranda *et al.* (2009) y Muñoz-López (2014), entre otros autores.

#### 2.5.4. Determinación de cenizas

La determinación de cenizas se realizó utilizando una mufla FELISA modelo 330E, empleando una diferencia de pesos debido a la calcinación de la muestra. La determinación en seco es el método más común para cuantificar los minerales en los alimentos, pues se basa en la descomposición de la materia orgánica quedando solamente materia inorgánica en la muestra. En una balanza analítica se pesó de 2-5 g de la muestra de papa en un crisol con peso constante, el cual previamente se puso a secar durante 2 horas. La muestra en dicho crisol se llevó a una mufla a 500 °C para su calcinación, después de 2 horas se colocó la muestra en un desecador y finalmente se volvió a pesar el crisol.

El contenido de cenizas fue calculado con la ecuación 2.3:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Peso del crisol con ceniza} - \text{Peso del crisol sin ceniza}}{\text{Peso de la muestra inicial}} \times 100 \quad (2.3)$$

#### 2.5.5. Contenido de humedad

Para la determinación de humedad (X), la muestra de papa fue introducida con una termobalanza de halógeno marca OHAUS, modelo MB5, la cual se llevó a cabo colocando 1 g de muestra en el platillo dentro de la cámara de secado, con una distribución homogénea dentro del mismo, a una temperatura de 65 °C y seleccionando el tiempo de secado en forma automática.

#### 2.5.6. Actividad de agua

Para determinar la actividad de agua ( $a_w$ ) de la papa fresca y descongelada, se empleó un medidor de actividad de agua marca AquaLab serie 3 modelo TE. La medición fue realizada a una temperatura de  $25 \pm 1$  °C.

### 2.5.7. Contenido de agua congelable

La cantidad de agua congelable fue medida a partir de diferencia de peso de agua residual, evaluando dicha conversión cada 15 minutos en un periodo de congelación de 180 minutos.

### 2.5.8. Incremento de volumen

El volumen inicial se calculó para cada forma de la papa fresca antes de ser congelada, posteriormente la evolución del incremento de volumen fue obtenida. Los períodos de congelación y los muestreos realizados fueron análogos a los realizados para la cantidad de agua congelable.

### 2.5.9. Análisis de color

El color se determinó al finalizar el proceso de congelación y descongelación, mediante un colorímetro MiniScan XE Plus para sólidos marca Reston, donde las lecturas de los parámetros de color **L**, **a**, y **b** se obtuvieron por el Sistema Hunterlab con el programa Software Universal versión 4.10.

Para la determinación de  $\Delta E$  se empleó la Ec. 1-1, descrita por Domínguez-Niño *et al.* (2016):

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (2.4)$$

Dónde:

$$\Delta L = L_{\text{final}} - L_{\text{inicial}} \quad [-] \quad (2.5)$$

$$\Delta a = a_{\text{final}} - a_{\text{inicial}} \quad [-] \quad (2.6)$$

$$\Delta b = b_{\text{final}} - b_{\text{inicial}} \quad [-] \quad (2.7)$$



## 2.6. Proceso de descongelación

La descongelación se llevó a cabo de manera natural a temperatura ambiente ( $27 \pm 2$  °C) durante 40 minutos a los experimentos que obtuvieron mejor respuesta respecto al porcentaje de agua congelable en los procesos de congelación y ultracongelación. Evaluando los parámetros fisicoquímicos de humedad ( $X$ ), actividad de agua ( $a_w$ ) y color ( $L$ ,  $a$ ,  $b$  y  $\Delta E$ ).

## 2.7. Análisis térmico de la papa

La conductividad térmica ( $k$ ) y la capacidad calorífica ( $C_p$ ) de la papa fueron obtenidas a partir del uso de las ecuaciones desarrolladas por Choi y Okos en 1986 (referido por ASHRAE, 2006), para la predicción de las propiedades térmicas de los constituyentes comunes encontrados en los alimentos y del hielo, como función de la temperatura en el intervalo de  $-40$  °C a  $150$  °C, con un error  $\leq 6\%$  (Fricke y Becker, 2001; ASHRAE, 2006). Dichas ecuaciones se presentan en la Tabla 2.3 y 2.4.

**Tabla 2.3** Ecuaciones de propiedades térmicas para componentes del alimento ( $-40$  °C  $\leq t \leq 150$  °C) (ASHRAE, 2006).

Propiedades térmicas	Componente del alimento	Modelo de la propiedad térmica
Conductividad térmica, W/(m K)	Proteína	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}t - 2.7178 \times 10^{-6}t^2$
	Grasas	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}t - 1.7749 \times 10^{-7}t^2$
	Carbohidratos	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}t - 4.3312 \times 10^{-6}t^2$
	Fibra	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}t - 3.1683 \times 10^{-6}t^2$
	Cenizas	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}t - 2.9069 \times 10^{-6}t^2$
Calor específico, J/(kg K)	Proteína	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}t - 1.3129 \times 10^{-6}t^2$
	Grasas	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}t - 4.8008 \times 10^{-6}t^2$
	Carbohidratos	$c_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}t - 5.9399 \times 10^{-6}t^2$
	Fibra	$c_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}t - 4.6509 \times 10^{-6}t^2$
	Ceniza	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}t - 3.6817 \times 10^{-6}t^2$

**Tabla 2.4** Ecuaciones de propiedades térmicas para agua y hielo<sup>a</sup> ( $-40\text{ °C} \leq t \leq 150\text{ °C}$ ) (ASHRAE, 2006).

	<b>Propiedad térmica</b>	<b>Modelo de la propiedad térmica</b>
<b>Agua</b>	Conductividad térmica, W/(m K)	$k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}t - 6.7036 \times 10^{-6}t^2$
	Calor específico, J/(kg K) <sup>b</sup>	$c_p = 4.1289 - 5.3062 \times 10^{-3}t + 9.9516 \times 10^{-4}t^2$
	Calor específico, J/(kg K) <sup>c</sup>	$c_p = 4.1289 - 9.0864 \times 10^{-5}t + 5.4731 \times 10^{-6}t^2$
<b>Hielo</b>	Conductividad térmica, W/(m K)	$k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}t + 1.0154 \times 10^{-4}t^2$
	Calor específico, J/(kg K)	$c_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}t$

<sup>a</sup>Proveniente de Choi y Okos (1986) (referenciado por ASHRAE, 2006)

<sup>b</sup>Para la temperatura del intervalo  $-40\text{ °C}$  a  $0\text{ °C}$ .

<sup>c</sup>Para la temperatura del intervalo de  $0\text{ °C}$  a  $150\text{ °C}$ .

El valor de temperatura inicial de congelación del alimento se obtuvo de los datos reportados por Della Rocca *et al.* (2013) para el cálculo del calor específico aparente. Así mismo las fracciones másicas de los componentes del alimento (proteínas, grasas, cenizas, agua) fueron determinadas experimentalmente para el alimento fresco, así como los carbohidratos se obtuvieron por diferencia. La fracción másica del agua no congelada y congelada en el alimento para cada tratamiento, fue determinada experimentalmente también.

### 2.7.1. Determinación de la conductividad térmica de la papa

La conductividad térmica de los alimentos dependen de la composición, la estructura y la temperatura del mismo, en el caso de los alimentos congelados, la conductividad térmica del sistema del hielo y agua líquida es calculado primero por algún método que involucre un sistema de dos fases, y el resultado de dicha conductividad del sistema hielo/agua es combinado sucesivamente con la conductividad térmica predicha para cada componente restante del alimento para determinar la conductividad térmica del producto alimenticio (Fricke y Becker, 2001).

Para obtener la conductividad térmica de alimentos que son constituidos por más de dos fases distintas de acuerdo al estudio de Fricke y Becker (2001), se deben aplicar continuamente métodos para la predicción de la conductividad térmica de dos componentes, dentro de los cuales, se encuentra el modelo introducido por Levy en 1981 (referido por Fricke y Becker, 2001), siendo una versión modificada de la ecuación de Eucken-Maxwell:

$$k = \frac{k_2[(2 + \Lambda) + 2(\Lambda - 1)F_1]}{(2 + \Lambda) - (\Lambda - 1)F_1} \quad (2.8)$$

Dónde:

$\Lambda = k_1/k_2$ , cociente de las conductividades térmicas

$k_1 =$  conductividad térmica del componente 1 (W/m K)

$k_2 =$  conductividad térmica del componente 2 (W/m K)

$F_1 =$  Parámetro introducido por Levy (1981), dado por:

$$F_1 = 0.5 \left\{ \left( \frac{2}{\sigma} - 1 + 2\phi_1 \right) - \left[ \left( \frac{2}{\sigma} - 1 + 2\phi_1 \right)^2 - \frac{8\phi_1}{\sigma} \right]^{1/2} \right\} \quad (2.9)$$

$$\sigma = \frac{(\Lambda - 1)^2}{(\Lambda - 1)^2 + \frac{\Lambda}{2}} \quad (2.10)$$

$\phi_1 =$  fracción de volumen del componente 1, dada por:

$$\phi_1 = \left[ 1 + \left( \frac{1}{w_1} - 1 \right) \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \right]^{-1} \quad (2.11)$$

$\rho_1 =$  Densidad del componente 1 (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_2 =$  Densidad del componente 2 (kg/m<sup>3</sup>)

$w_1 =$  Fracción másica del componente 1

### 2.7.2. Determinación del calor específico de la papa

Respecto a la investigación reportada por Fricke y Becker (2001), de los distintos modelos de estimación para el cálculo del calor específico aparente, uno de los que ofrece menor error en la predicción de la propiedad térmica respecto a los valores experimentales es el de Schwartzberg en 1976 (referido por Fricke y Becker, 2001), donde se asume que un alto contenido de humedad en los alimentos puede ser modelado como una solución diluida ideal, dicho autor desarrolló la siguiente ecuación de calor específico aparente para alto contenido de humedad en los alimentos:

$$c_a = c_u + (w_b - w_{wo})\Delta c + Ew_s \left( \frac{RT_o^2}{M_w t^2} \right) - 0.8\Delta c \quad (2.12)$$

Dónde:

$c_a$  = calor específico aparente del alimento (kJ/kg K)

$c_u$  = calor específico del alimento (kJ/kg K)

$c_i$  = calor específico de los componentes individuales del alimento (kJ/kg K)

$w_i$  = fracción másica de los componentes del alimento

$w_s$  = fracción másica de los sólidos del alimento

$w_{wo}$  = fracción másica del agua no congelada en el alimento

$w_b$  = fracción másica del agua ligada en el alimento;  $0.4w_p$

$w_p$  = fracción másica de la proteína en el alimento

$\Delta c = c_w - c_{ice}$ , diferencia entre el calor específico del agua y del hielo

$c_w$  = Calor específico del agua (kJ/kg K)

$c_{ice}$  = Calor específico del hielo (kJ/kg K)

$E = M_w/M_s$ , cociente de la masa molar del agua y la masa molar de los sólidos del alimento

$M_w$  = masa molar del agua (kg/mol)

$M_s$  = masa molar de los sólidos del alimento (kg/mol)

$t$  = temperatura del alimento (°C)

R = constante del gas ideal (8.314 J/mol K)

T<sub>0</sub> = punto de congelación del agua (273.2 K)

Para el cálculo del calor específico del alimento (C<sub>u</sub>) y la masa molar de los sólidos del alimento (M<sub>s</sub>) se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$c_u = \sum c_i w_i \quad (2.13)$$

$$M_s = \frac{w_s R T_0^2}{-(w_{w0} - w_b) L_o t_f} \quad (2.14)$$

Dónde:

t<sub>f</sub> = temperatura inicial de congelación del alimento (°C)

L<sub>o</sub> = Calor latente de fusión del agua a 0 °C (333 600 J/kg)

## 2.8. Análisis estadístico

Las respuestas obtenidas sobre el agua congelable, incremento de volumen y color fueron analizados con el software Minitab versión 16. Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para cada factor. Para evaluar el efecto de las variables de congelación y ultracongelación sobre el agua congelable e incremento de volumen se realizó la prueba estadística de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ), mientras que para los parámetros de color (**L**, **a**, **b** y **ΔE**) así como para las propiedades térmicas se utilizó la prueba de Dunnett ( $\alpha = 0.05$ ).

**CAPÍTULO 3**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Caracterización fisicoquímica de la papa

Para realizar el presente proyecto se utilizó papa (*Solanum tuberosum*) variedad San José, de la región de La Perla, Veracruz, la cual fue seleccionada y acondicionada de acuerdo a lo establecido previamente en el Capítulo 2. La Tabla 3.1 presenta los resultados de la caracterización realizada a la papa fresca.

**Tabla 3.1** Caracterización fisicoquímica y térmica de la papa (*Solanum tuberosum*).

Determinación	Valor
X (%)	81.505
$a_w$	0.991
Color interior	
<b>L</b>	31.58
<b>a</b>	0.33
<b>b</b>	8.12
Color exterior	
<b>L</b>	24.45
<b>a</b>	13.66
<b>b</b>	5.6
pH	6.15
Proteínas (%)	2.232
Grasas (%)	1.209
Cenizas (%)	1.304
Carbohidratos (%)	13.748
Cp (kJ/kg K)	3.670
k (W/m K)	0.5415

Dicho tubérculo mostró una actividad de agua superior a 0.95, evidenciando su alta disponibilidad en la fracción de agua libre para intervenir en reacciones químicas,

enzimáticas y microbiológicas que degradan al alimento. Los valores del color indicaron una baja luminosidad (**L**) tanto en el interior (31.58) como en el exterior (24.45) del tubérculo; la cromaticidad (**a** y **b**) del tejido interior de la papa fue amarillorrojiza, siendo el color de dicha pulpa mayormente amarilla (**b**= 8.12), sin embargo, la cromaticidad de la epidermis fue mayormente roja (**a**= 13.66).

El valor de humedad se encontró dentro de los intervalos reportados por la FAO (2008) y Pumisacho y Sherwood (2002), de 80% y 63-87%, respectivamente. Los resultados obtenidos de la cuantificación de proteínas y cenizas son similares a los reportados por Pumisacho y Sherwood (2002), 0.7-4.6% y 0.44-1.9%, correspondientemente, para la papa *Solanum tuberosum*, sin embargo, Singh y Kaur (2009) reportan valores ligeramente menores (0.6-2.1%) de contenido proteico para este tubérculo. El valor de grasas encontradas fue superior a los valores reportados por Pumisacho y Sherwood (2002), de 0.02-0.96%.

### **3.2. Congelación de papa**

Como se mencionó en la Sección 2.4.1.1, para el proceso de congelación, se determinaron como variables de respuesta: el agua congelable, el incremento de volumen y el color. Dichos parámetros permitieron evaluar la calidad de la papa congelada, así como también determinar las propiedades térmicas del tubérculo.

#### **3.2.1. Cantidad de agua congelable de la papa durante el proceso de congelación**

En el proceso de congelación, la fracción másica de hielo en el alimento incrementa a medida que la temperatura disminuye, mientras que la fracción másica de agua no congelada disminuye, así mientras mayor sea el cambio del agua libre a una



condición, más estable es durante la congelación, y mayor será la conservación de la calidad del alimento (Fricke y Becker, 2001; Barreiro y Sandoval, 2006).

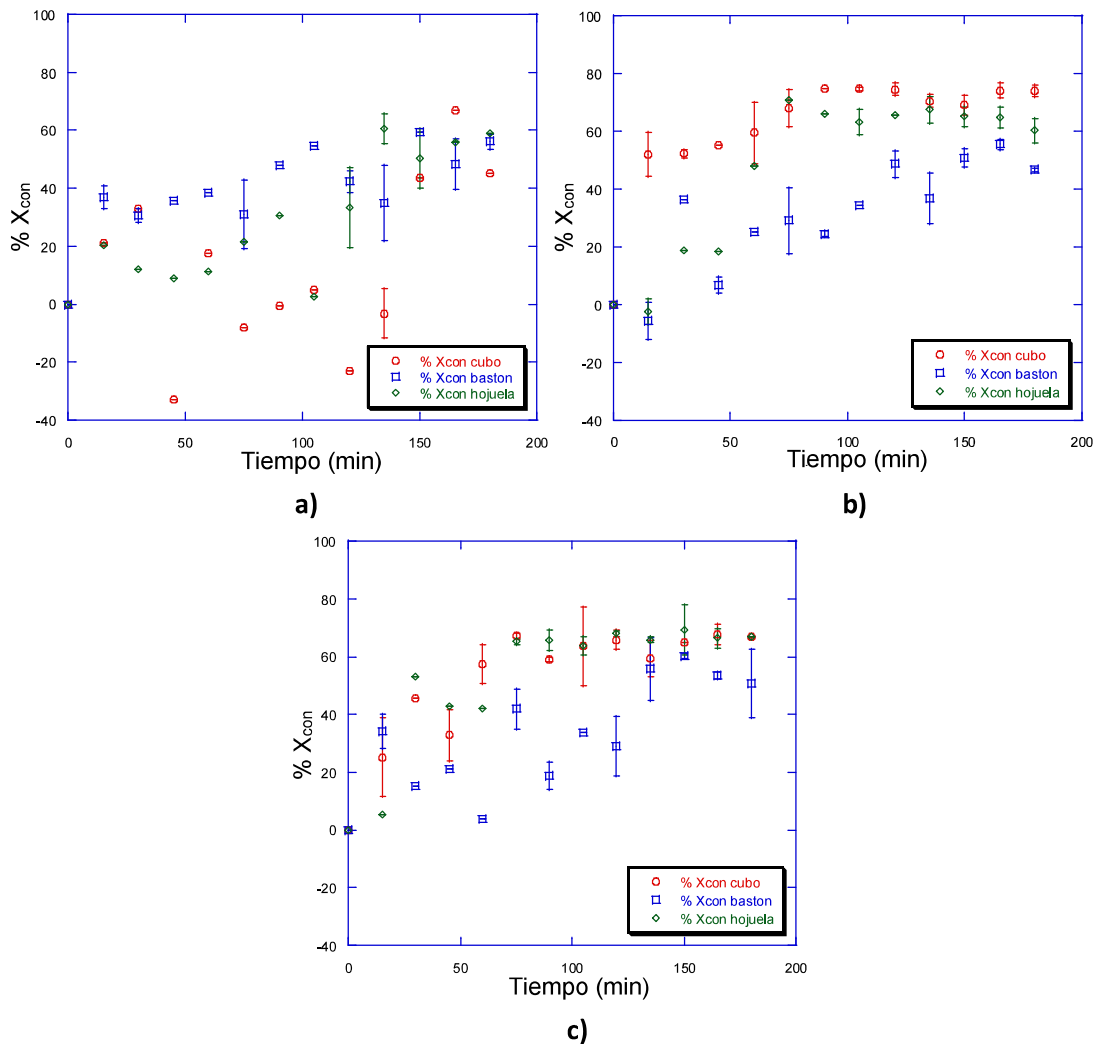
Debido a lo anterior, la cantidad de agua congelable ( $X_{con}$ ) se determinó por medio de la metodología planteada en la Sección 2.5.7. Del 81.505% de agua disponible en la papa, se logró congelar hasta un 73.96% a través del proceso de congelación que se presenta a continuación.

### 3.2.1.1. Curva de evolución de congelación del agua

La evolución de la cantidad de  $X_{con}$  para las diferentes condiciones de operación empleadas se presenta en las Figuras 3.1-3.2. La Figura 3.1 expone el efecto del proceso de congelación a -5, -10 y -15 °C, sobre el porcentaje de agua congelable en las tres distintas formas de papa, sin pretratamiento.

Como se puede observar en la Figura 3.1a, a la temperatura de -5 °C se observaron diferencias significativas entre las formas, presentando la forma de cubo la mayor inestabilidad en el proceso, donde en varios puntos se presentó un porcentaje de agua no congelada superior a la inicial (mayor al 81.505%). La máxima cantidad de agua congelable a -5 °C se alcanzó a partir de los 150 minutos para las tres formas.

A -10 °C se presentaron también diferencias significativas entre las formas, mostrando una evolución rápida en la cantidad del  $X_{con}$  obtenida en comparación con -5 °C, donde el inicio del incremento del  $X_{con}$  de la hojuela (70.84%) se presentó a partir de los 75 minutos, del cubo (74.99%) a los 90 minutos y de la forma de bastón (48.65%) a partir de los 120 minutos (Figura 3.1b). Comportamiento similar se presentó en las muestras congeladas a -15 °C (Figura 3.1c), observando diferencias significativas entre las formas, siendo la forma de bastón la que se congela con mayor lentitud, alcanzando su máxima cantidad de  $X_{con}$  (60.17%) a partir de los 150 minutos, en comparación con el cubo y la hojuela (75 minutos).



**Figura 3.1** Evolución de la congelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa: a) - 5 °C, b) -10 °C y c) -15 °C.

Los resultados obtenidos indican que el empleo de temperaturas bajas de congelación (-10 y -15 °C) dan como resultado un mayor porcentaje de agua congelable en las diferentes formas de papa empleadas (70.79-73.95%), además de ser procesos más estables en comparación con los tratamientos realizados a una temperatura de congelación alta (-5 °C) alcanzando valores de  $X_{con}= 66.28\%$ .

Lo anterior es posiblemente debido a que la temperatura de congelación de -5 °C se encuentra cercana a la temperatura inicial de congelación de la papa (1.27-2 °C), en donde a esta temperatura se da una formación abrupta de cristales provocando que

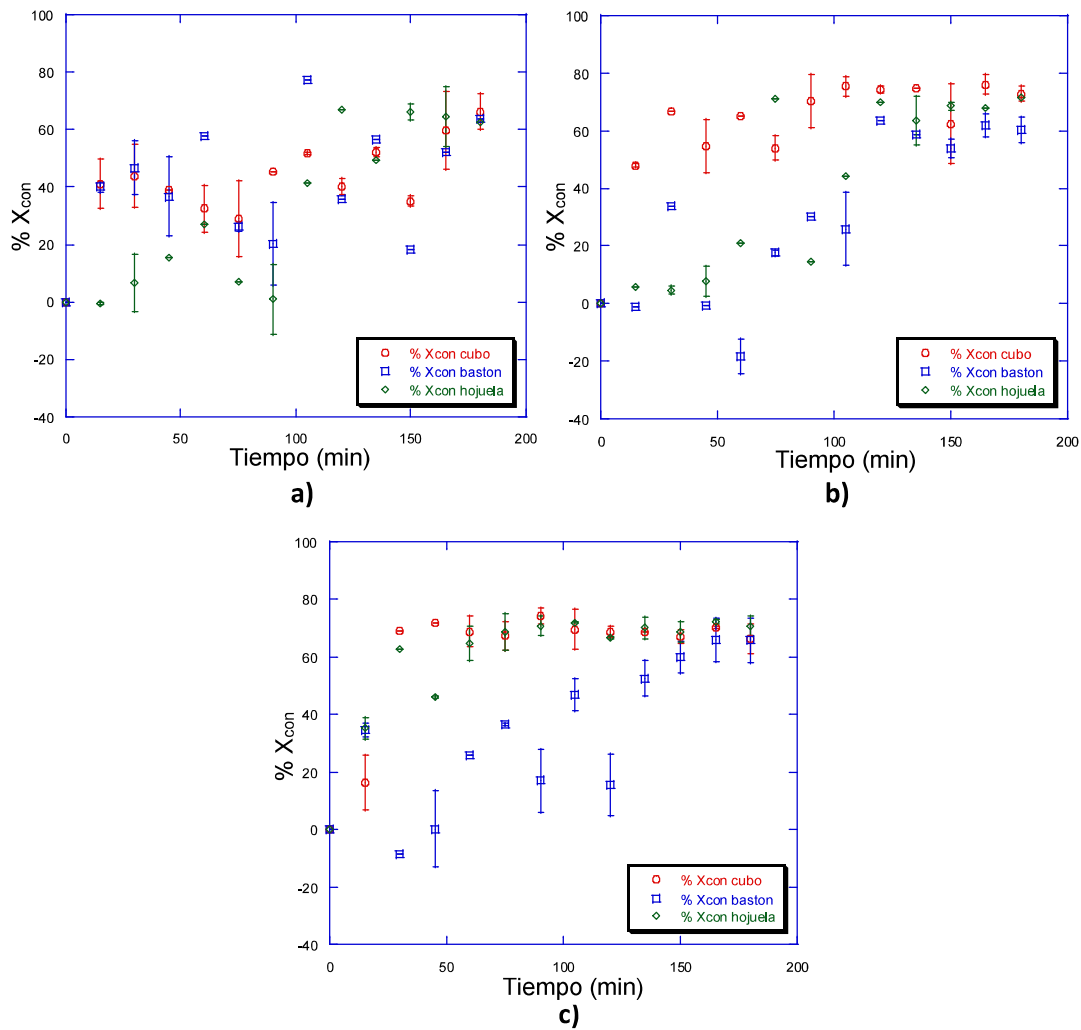
la fase líquida de la papa se concentre y con ello se disminuya el punto de congelación del alimento (Della *et al.*, 2013; Cuibus *et al.*, 2013).

Cuibus *et al.* (2013) evaluaron el proceso de congelación de papa a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los investigadores observaron que a temperaturas cercanas a  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  se obtenía una fracción másica de hielo formada menor (0.4) en comparación al empleo de temperaturas de congelación cercanas a  $-8$  y  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , donde la fracción obtenida fue de 0.55 y 0.63, respectivamente; concluyendo que el empleo de altas temperaturas de congelación provocan un menor porcentaje de agua congelable en la muestra. Estos valores son inferiores a los reportados en este trabajo, lo cual puede ser atribuido a la forma de corte empleada, donde el volumen sometido al proceso fue menor al utilizado por Cuibus *et al.* (2013) (cilindro de 4.5 cm de diámetro y 7 cm de largo).

La Figura 3.2 presenta las curvas de congelación de las tres diferentes formas de papa pretratadas con ácido cítrico y congeladas a  $-5$ ,  $-10$  y  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los experimentos con pretratamiento a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  presentados en la Figura 3.2a presentaron una evolución distinta respecto a los experimentos sin pretratamiento a la misma temperatura, siendo la hojuela la que presentó mayor inestabilidad, debido a que a los 15 minutos mostró una cantidad mayor de agua respecto al contenido de agua inicial (Tabla 3.1). Las tres formas alcanzaron su máximo porcentaje de  $X_{\text{con}}$  de 66.28% (cubo), 63.91% (bastón) y 62.40% (hojuela) al final del proceso (180 min).

Así mismo, los experimentos con pretratamiento a  $-10$  y  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.2b y Figura 3.2c) demostraron un comportamiento similar a los experimentos a las mismas temperaturas de congelación de las muestras sin pretratamiento, en los cuales la forma de la muestra tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de  $X_{\text{con}}$ . Sin embargo, se observó que la forma de bastón a diferencia de los experimentos sin pretratamiento, presentó dentro de la primera hora del proceso varios puntos en los que la cantidad de agua no congelada fue mayor a la inicial (mayor a 81.505%), dicho efecto pudo ser atribuido al pretratamiento empleado.



**Figura 3.2** Evolución de la congelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa pretratada: a) -5 °C, b) -10 °C y c) -15 °C.

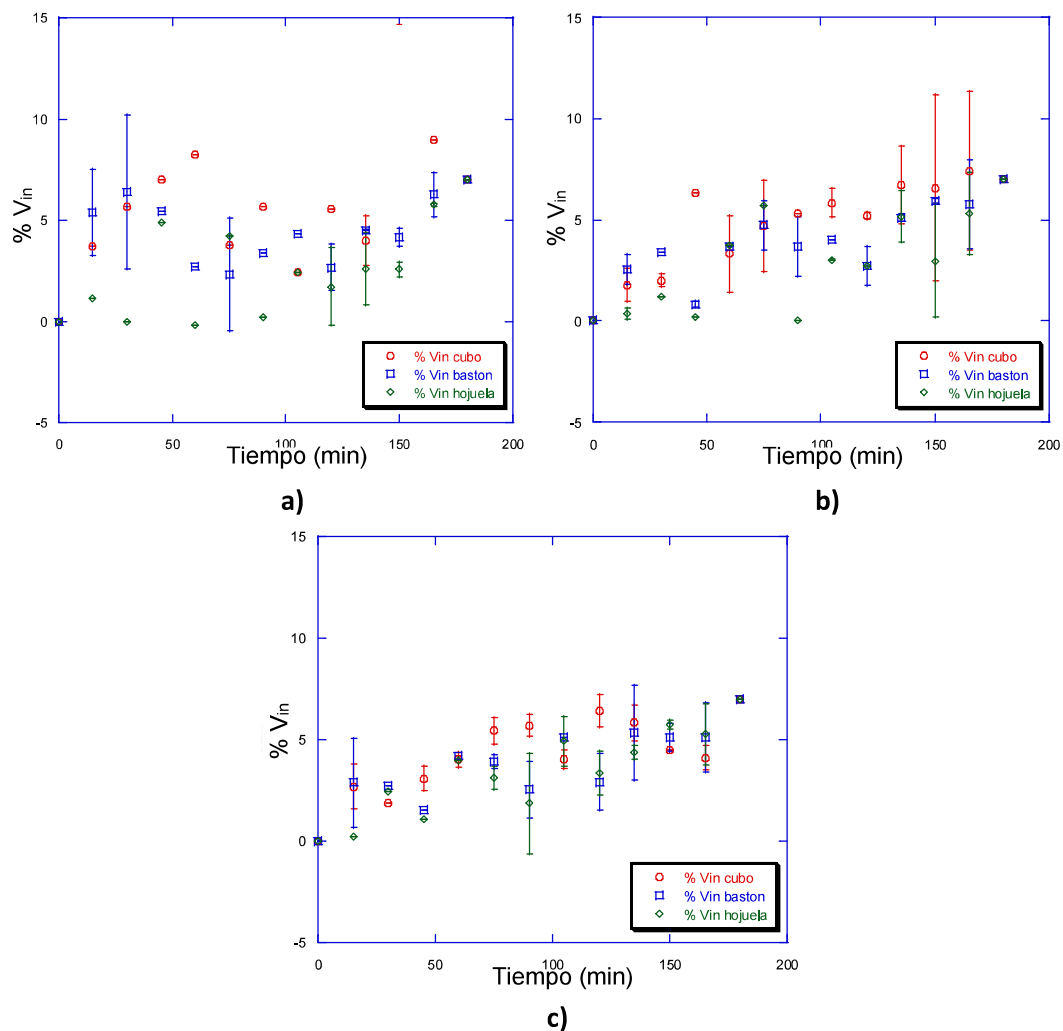
### 3.2.2. Incremento de volumen de la papa durante el proceso de congelación

Durante la congelación, el incremento de volumen en el alimento depende del contenido de humedad y de su composición, así, mientras más humedad tiene el alimento más apreciable será su cambio de volumen (Barreiro y Sandoval, 2006). Por esta razón, se estudió la evolución del incremento de volumen ( $V_{in}$ ) durante el proceso de congelación de papa, determinándolo mediante la metodología descrita

en la Sección 2.5.8. El volumen inicial para los diferentes tamaños de muestra fue de  $1 \text{ cm}^3$  (cubo),  $7 \text{ cm}^3$  (bastón) y  $3.926 \text{ cm}^3$  (hojuela).

### 3.2.2.1. Curva de evolución de incremento de volumen

La evolución del  $V_{in}$  en el proceso de congelación es mostrada en las Figuras 3.3-3.4. La Figura 3.3 presenta el efecto de las condiciones de operación en la congelación ( $-5$ ,  $-10$  y  $-15$  °C) para las tres formas de papa sin pretratamiento.



**Figura 3.3** Evolución de  $V_{in}$  de cubos, bastones y hojuelas de papa durante el proceso de congelación a: a)  $-5$  °C, b)  $-10$  °C y c)  $-15$  °C.

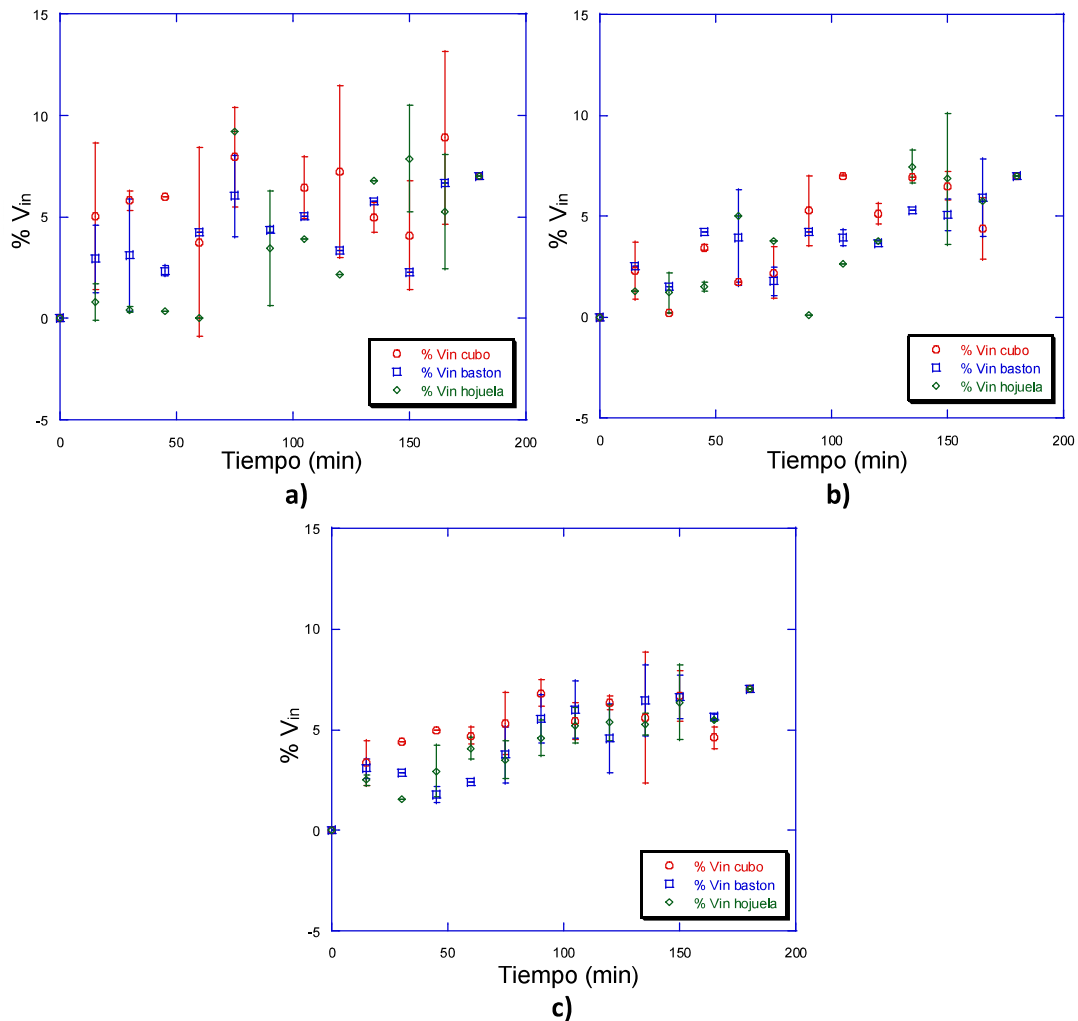
Durante la congelación a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  se mostró un comportamiento inestable por parte de las tres formas de papa (Figura 3.3a), presentando cada una de ellas diferencia significativa en la evolución de  $V_{in}$  durante el proceso de congelación. Sin embargo, obtuvieron un incremento similar al 7% al final de la congelación.

Con respecto a las muestras congeladas a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.3b) se observó una evolución lenta en el  $V_{in}$ , presentando en general una diferencia significativa entre las formas, donde la hojuela obtuvo el comportamiento más inestable. Al final del proceso la forma de cubo, bastón y hojuela demostraron un incremento semejante al 7%. Del mismo modo, en la Figura 3.3c se muestra una evolución lenta en el  $V_{in}$  a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presentando en la fase intermedia de congelación un comportamiento distinto cada una de las formas empleadas, sin embargo al final de la congelación, el incremento de tamaño fue similar para todas, aproximadamente de 7%.

El incremento de volumen final para las distintas formas a diferentes condiciones de operación empleadas, indica que la papa cuyo contenido inicial de humedad es de 81.505%, logró alcanzar como alimento congelado un incremento máximo de tamaño de 7% después de 180 minutos de proceso de congelación, valor aceptable puesto que la mayoría de los alimentos y especímenes vivos debido a su composición se expanden en la congelación en menor medida que el agua pura (Zaritzky, 2010), siendo el incremento volumétrico de esta última de 9% a los  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Alvarez y Canet, 1997; Pham, 2016).

El  $V_{in}$  es consecuencia del congelamiento del agua en el alimento, encontrándose una relación con las curvas de evolución de congelación sin pretratamiento, observando el incremento simultáneo del porcentaje de  $X_{con}$  con el  $V_{in}$  en las muestras.

En la Figura 3.4 se muestra el cambio volumétrico durante el proceso de congelación a  $-5$ ,  $-10$  y  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para cubos, bastones y hojuelas pretratados con ácido cítrico.



**Figura 3.4** Evolución de  $V_{in}$  de cubos, bastones y hojuelas de papa con pretratamiento durante el proceso de congelación a: a)  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , b)  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y c)  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Las formas de papa pretratadas a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.4a) mostraron un comportamiento distinto respecto a los formas de papa sin pretratamiento a la misma temperatura, donde su inestabilidad en el proceso fue mayor. Sin embargo, al final de la congelación, tuvieron un incremento similar al 7%.

Las muestras de papa pretratadas con ácido cítrico a una temperatura de  $-10$  y  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figuras 3.4b y 3.4c, respectivamente) presentaron una evolución de  $V_{in}$  similar a las muestras no pretratadas a las mismas temperaturas, las cuales mostraron diferencia significativa entre las formas respecto a su incremento volumétrico durante

el proceso de congelación, obteniendo de igual manera al final de éste un incremento análogo al 7%.

El comportamiento inestable a lo largo del proceso de congelación es atribuido a que la mayoría de los constituyentes en el alimento se contraen cuando la temperatura es reducida, mientras que el agua se expande. Debido a esto el cambio volumétrico en los alimentos no es uniforme a lo largo del sistema y se producen daños mecánicos a los mismos (Zaritzky, 2010).

Del mismo modo que en las muestras no tratadas se observó una relación entre el  $V_{in}$  en las formas pretratadas congeladas y la cantidad de  $X_{con}$  obtenida en las mismas.

### 3.2.3. Comparación y análisis de color de la papa fresca y congelada

De los cuatro atributos de calidad de los productos alimenticios como lo son el color, la textura, el sabor y las propiedades nutricionales, el color probablemente es el principal factor considerado, ya que la apariencia del alimento es un criterio primario para el consumidor (Lamikanra, 2002).

La medición de color se realizó al finalizar los procesos de congelación, en base al estándar de la papa fresca, por medio de la metodología de la Sección 2.5.9, obteniendo los parámetros de color **L**, **a**, **b** y  $\Delta E$  para cada uno de los tratamientos que se presentan en la Tabla 3.2. Los valores estándar para la papa fresca fueron: **L**= 31.58, **a**= 0.33 y **b**= 8.12. Recordando que el parámetro **L** (negro vs blanco) representa la luminosidad del alimento, el parámetro **a** (verde vs rojo) y el parámetro **b** (azul-amarillo) representa a su vez la cromaticidad del mismo.

El análisis estadístico con prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ), indicó que para la mayoría de los experimentos realizados existió diferencia significativa en la luminosidad de la papa congelada con respecto a la luminosidad del producto inicial, debido a que el valor del parámetro **L** aumentó y logró un incremento hasta de 57%.



Finalmente, los únicos experimentos que no mostraron diferencia significativa fueron la forma de bastones con y sin pretratamiento a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la forma de hojuela con pretratamiento a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y sin pretratamiento a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 3.2** Parámetros de color **L**, **a**, **b** y  $\Delta E$  para los distintos experimentos de congelación.

Exp	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$t_a$	Pret	L	a	b	$\Delta E$
1	-5	C	S/AC	46.16 <sup>0.00</sup>	1.85 <sup>0.00</sup>	14.8 <sup>0.00</sup>	18.55 <sup>0.000</sup>
2	-5	C	C/AC	43.36 <sup>2.828</sup>	1.675 <sup>0.289</sup>	13.32 <sup>3.082</sup>	14.95 <sup>3.082</sup>
3	-5	B	S/AC	36.645 <sup>3.896</sup>	1.78 <sup>0.197</sup>	10.135 <sup>1.053</sup>	6.74 <sup>0.087</sup>
4	-5	B	C/AC	39.22 <sup>0.00</sup>	0.77 <sup>0.00</sup>	11.96 <sup>0.00</sup>	10.41 <sup>0.000</sup>
5	-5	H	S/AC	42.77 <sup>0.00</sup>	0.84 <sup>0.00</sup>	10.45 <sup>0.00</sup>	12.22 <sup>0.000</sup>
6	-5	H	C/AC	38.63 <sup>0.00</sup>	0.51 <sup>0.00</sup>	10.22 <sup>0.00</sup>	8.18 <sup>0.000</sup>
7	-10	C	S/AC	43.755 <sup>3.486</sup>	0.635 <sup>0.784</sup>	7.165 <sup>7.53</sup>	14.14 <sup>3.28</sup>
8	-10	C	C/AC	45.45 <sup>0.82</sup>	-0.07 <sup>0.014</sup>	11.81 <sup>0.452</sup>	15.405 <sup>0.502</sup>
9	-10	B	S/AC	46.885 <sup>4.447</sup>	1.535 <sup>0.007</sup>	15.525 <sup>0.007</sup>	20.065 <sup>2.665</sup>
10	-10	B	C/AC	49.725 <sup>3.471</sup>	0.395 <sup>0.728</sup>	17.28 <sup>1.499</sup>	23.695 <sup>3.896</sup>
11	-10	H	S/AC	40.985 <sup>8.633</sup>	0.155 <sup>0.007</sup>	11.73 <sup>3.181</sup>	11.265 <sup>9.948</sup>
12	-10	H	C/AC	44.93 <sup>0.00</sup>	-0.93 <sup>0.00</sup>	9.16 <sup>0.00</sup>	14.36 <sup>0.000</sup>
13	-15	C	S/AC	49.175 <sup>2.071</sup>	0.76 <sup>1.343</sup>	13.275 <sup>0.459</sup>	19.575 <sup>1.445</sup>
14	-15	C	C/AC	49.645 <sup>0.997</sup>	0.055 <sup>0.615</sup>	14.98 <sup>0.042</sup>	21.145 <sup>0.728</sup>
15	-15	B	S/AC	48.945 <sup>0.261</sup>	0.67 <sup>0.749</sup>	16.92 <sup>0.735</sup>	22.83 <sup>1.103</sup>
16	-15	B	C/AC	48.395 <sup>2.524</sup>	-0.215 <sup>0.601</sup>	13.905 <sup>4.857</sup>	19.57 <sup>6.321</sup>
17	-15	H	S/AC	38.93 <sup>2.022</sup>	0.14 <sup>0.028</sup>	9.875 <sup>0.912</sup>	8.515 <sup>1.491</sup>
18	-15	H	C/AC	43.87 <sup>2.46</sup>	-0.495 <sup>0.205</sup>	9.755 <sup>1.011</sup>	13.27 <sup>2.588</sup>

En base a estudios con condiciones análogas de congelación de la papa, resultados similares en productos agrícolas fueron obtenidos por Bartolome *et al.* (1996) y Holzwarth *et al.* (2012), quienes al estudiar el efecto de la congelación lenta sobre los parámetros de color en piña a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en fresas a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, observaron que existió un incremento de luminosidad en los productos.

De acuerdo con los resultados, el parámetro **a** infiere un pardeamiento enzimático. El análisis estadístico con prueba de Dunnett ( $\alpha = 0.05$ ) reveló que no existió diferencia significativa entre los valores de **a** de las muestras procesadas y la papa fresca a las diferentes temperaturas de congelación estudiadas. De igual manera se observó que

el pretratamiento con ácido cítrico no afectó las muestras, pues las muestras sin pretratamiento tampoco presentaron diferencias con el alimento fresco.

Con respecto al parámetro **b**, se observó un incremento en la mayoría de los experimentos. El análisis estadístico (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ) mostró diferencia significativa entre los tratamientos de la forma de bastón con y sin pretratamiento a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y sin pretratamiento a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en relación a los demás experimentos que no presentaron diferencia con respecto al producto inicial y que no fueron afectados por el proceso de congelación a las distintas condiciones empleadas.

Lo anterior puede ser debido a la conservación de los carotenoides en la papa, ya que estos compuestos son los responsables del color amarillo en la piel y la pulpa del tubérculo (Bianeth y Restrepo, 2013); en los procesos de congelación, la adición de antioxidantes y la exclusión del oxígeno disminuyen las pérdidas de los carotenoides durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos (Meléndez-Martínez *et al.*, 2013). Sin embargo, en un estudio realizado por Bartolome *et al.* (1996), donde someten piña a congelación lenta, la cual debe principalmente su coloración amarilla a su contenido de carotenoides, los investigadores reportaron un ligero decremento en los valores del parámetro **b** presentando diferencias significativas con respecto a la piña fresca, atribuyendo dicho efecto a la desintegración celular, la degradación de pigmentos e isomerización de los carotenoides provocadas por el proceso.

La diferencia total de color ( $\Delta E$ ) presentó diferencia significativa en los experimentos con respecto al producto inicial (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ). La muestra que presentó la mayor  $\Delta E$  (23.965) estuvo bajo las condiciones de temperatura de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , forma de bastón y con pretratamiento, mientras que la muestra con menor  $\Delta E$  (6.700) fue sometida a la temperatura de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , forma de bastón y sin pretratamiento.

#### 3.2.4. Características finales de la papa congelada

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados finales de los experimentos realizados

utilizando el diseño 3x3x2. El análisis estadístico con prueba de Tukey ( $\alpha= 0.05$ ) aplicado a los resultados finales de los parámetros de  $X_{con}$  indicó que hubo diferencia significativa entre los experimentos, obteniendo la mayor cantidad de agua congelable el experimento 7 (73.957%), mientras que el experimento 1 presentó el menor porcentaje (45.047%).

**Tabla 3.3** Resultados experimentales finales de la papa congelada.

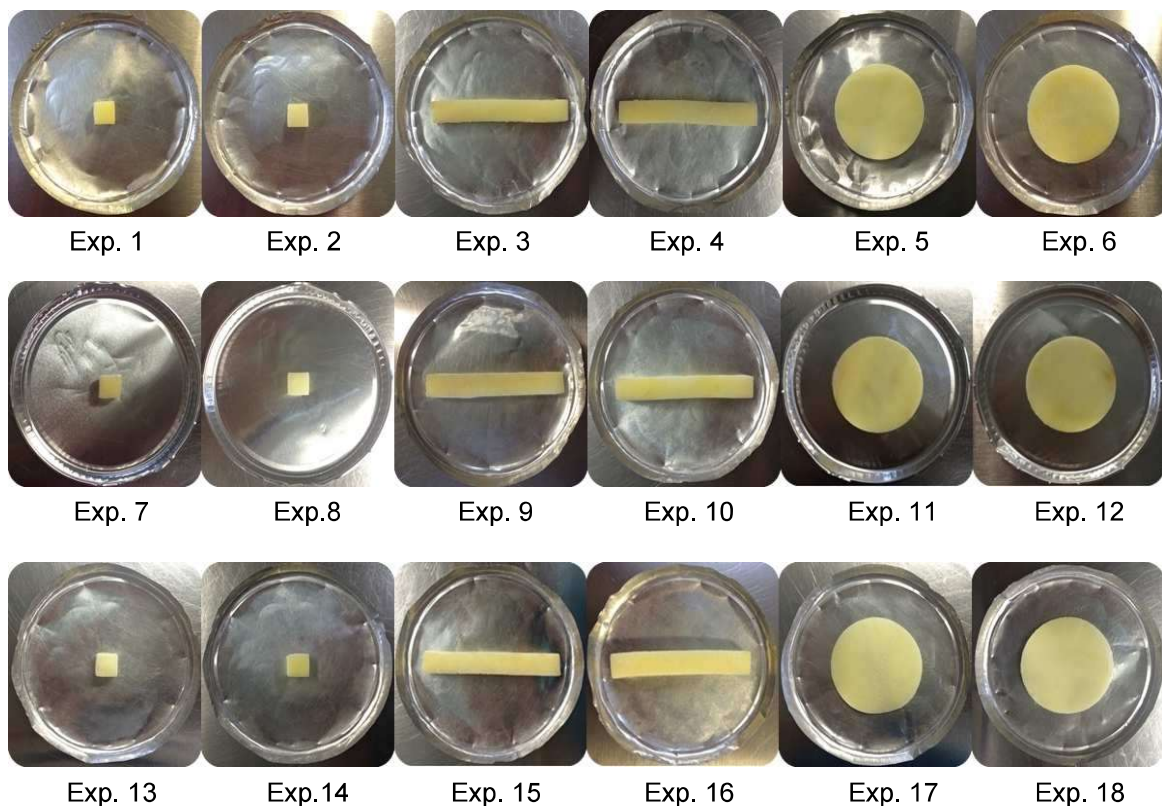
Exp	$T_c$ (°C)	$t_a$	Pret	$X_{con}$ (%)	$V_{in}$ (%)	$\Delta E$
1	-5	C	S/AC	45.047 <sup>0.000</sup>	7.002 <sup>0.000</sup>	18.55 <sup>0.000</sup>
2	-5	C	C/AC	66.280 <sup>6.148</sup>	7.001 <sup>0.002</sup>	14.95 <sup>3.082</sup>
3	-5	B	S/AC	56.094 <sup>2.426</sup>	7.002 <sup>0.002</sup>	6.74 <sup>0.087</sup>
4	-5	B	C/AC	63.913 <sup>0.000</sup>	7.001 <sup>0.000</sup>	10.41 <sup>0.000</sup>
5	-5	H	S/AC	59.081 <sup>0.000</sup>	7.001 <sup>0.000</sup>	12.22 <sup>0.000</sup>
6	-5	H	C/AC	62.407 <sup>0.000</sup>	7.001 <sup>0.000</sup>	8.18 <sup>0.000</sup>
7	-10	C	S/AC	73.957 <sup>2.057</sup>	7.000 <sup>0.001</sup>	14.14 <sup>3.28</sup>
8	-10	C	C/AC	72.902 <sup>2.477</sup>	7.001 <sup>0.000</sup>	15.405 <sup>0.502</sup>
9	-10	B	S/AC	46.669 <sup>0.637</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	20.065 <sup>2.665</sup>
10	-10	B	C/AC	60.279 <sup>4.534</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	23.695 <sup>3.896</sup>
11	-10	H	S/AC	60.236 <sup>4.247</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	11.265 <sup>9.948</sup>
12	-10	H	C/AC	71.360 <sup>0.000</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	14.36 <sup>0.000</sup>
13	-15	C	S/AC	66.742 <sup>0.149</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	19.575 <sup>1.449</sup>
14	-15	C	C/AC	66.331 <sup>5.236</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	21.145 <sup>0.728</sup>
15	-15	B	S/AC	50.901 <sup>11.819</sup>	7.002 <sup>0.000</sup>	22.83 <sup>1.103</sup>
16	-15	B	C/AC	65.757 <sup>7.779</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	19.576 <sup>6.321</sup>
17	-15	H	S/AC	66.909 <sup>0.166</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	8.515 <sup>1.491</sup>
18	-15	H	C/AC	70.799 <sup>3.449</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	13.27 <sup>2.588</sup>

Para los valores finales de  $V_{in}$  el análisis de varianza con prueba de Tukey ( $\alpha= 0.05$ ) mostró que no existió una diferencia significativa entre los tratamientos. El valor obtenido de 7% es aceptable pues como se mencionó anteriormente, la composición del alimento es distinta a la composición del agua pura.

La  $\Delta E$  demostró que en la mayoría de los experimentos existió diferencia significativa con relación al estándar del producto inicial (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ), a pesar de que el parámetro **a** no mostró diferencia significativa, pues las muestras no tuvieron un

pardeamiento al final del proceso, el parámetro **b** sí mostro diferencia significativa para tres tratamientos en forma de bastón y el parámetro **L** presentó en la mayoría de los experimentos diferencia significativa pues tuvo un incremento probablemente atribuido a la formación de cristales de hielo en la superficie del alimento, observando que los experimentos que presentaron diferencia significativa en el parámetro **L** fueron los mismos que presentaron diferencia en la  $\Delta E$ , por lo que se encontró que la luminosidad tuvo la mayor influencia sobre los valores de  $\Delta E$  (véase Tabla 3.2).

En la Figura 3.5 se muestra físicamente el color final de las distintas formas de papa congelada, observando mejor lo descrito por los parámetros de color.



**Figura 3.5** Muestras de papa congelada a diferentes condiciones.

### 3.3. Ultracongelación de papa

Al igual que en el proceso de congelación y como se indicó en la Sección 2.4.2.1, en

el proceso de ultracongelación se evaluaron como variable respuesta el agua congelable, el incremento volumétrico y el color, así como las propiedades térmicas de la papa.

### **3.3.1. Cantidad de agua congelable de la papa durante el proceso de ultracongelación**

La evolución de la cantidad de agua congelable ( $X_{con}$ ) durante el proceso de ultracongelación de papa fue estudiada ya que indica la cantidad de agua libre solidificada y estable en el alimento, así como la disponibilidad de la misma para su participación en las reacciones de descomposición del alimento.

El  $X_{con}$  se determinó por medio de la metodología planteada en la Sección 2.5.7. El valor promedio inicial de agua libre disponible en el alimento fue de 81.505%, la cual se logró congelar hasta un 77.87% con la aplicación del proceso de ultracongelación, como se presenta a continuación.

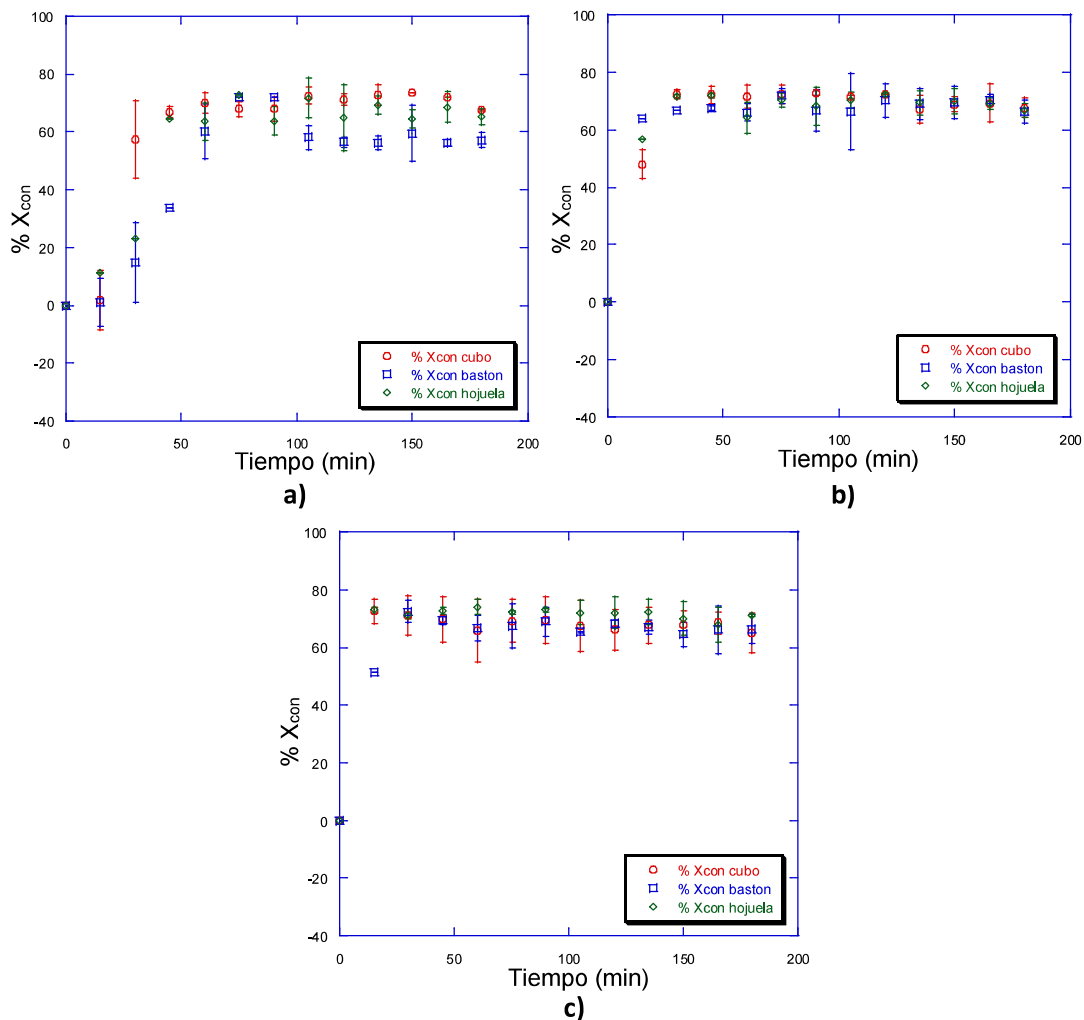
#### **3.3.1.1. Curva de evolución de ultracongelación del agua**

El efecto de las condiciones para el proceso de ultracongelación sobre la cantidad de  $X_{con}$  se muestra en la Figura 3.6 y la Figura 3.7. La Figura 3.6 presenta la evolución de ultracongelación a -40, -60 y -80 °C, para las tres distintas formas de la papa, sin pretratamiento.

Para las muestras ultracongeladas de cubos y bastones de papa a -40 °C, la Figura 3.6a indica que el proceso comienza a estabilizarse a partir de 60 minutos presentando un 70.06% y 60.09% de  $X_{con}$ , respectivamente, y a partir de los 45 minutos para las hojuelas (64.66%). La Figura 3.6b muestra que a -60 °C el proceso empieza su estabilización a partir de los 30 minutos para las tres formas de papa con un porcentaje de  $X_{con}$  de 72.44% (cubo), 66.91% (bastón) y 71.73% (hojuela).

Mientras que en la Figura 3.6c se observa que la estabilización del proceso comienza a los 15 minutos para los cubos (72.57%) y las hojuelas (72.96%), y a los 30 minutos para los bastones (72.37%).

Se observó que el empleo de temperaturas bajas de congelación (-60 y -80 °C) dan lugares a procesos más estables y se alcanza un mayor porcentaje de  $X_{con}$  (67.73-71.07%) en los primeros minutos del proceso, en comparación con la temperatura de -40 °C que alcanzó valores de  $X_{con}=67.54\%$ .

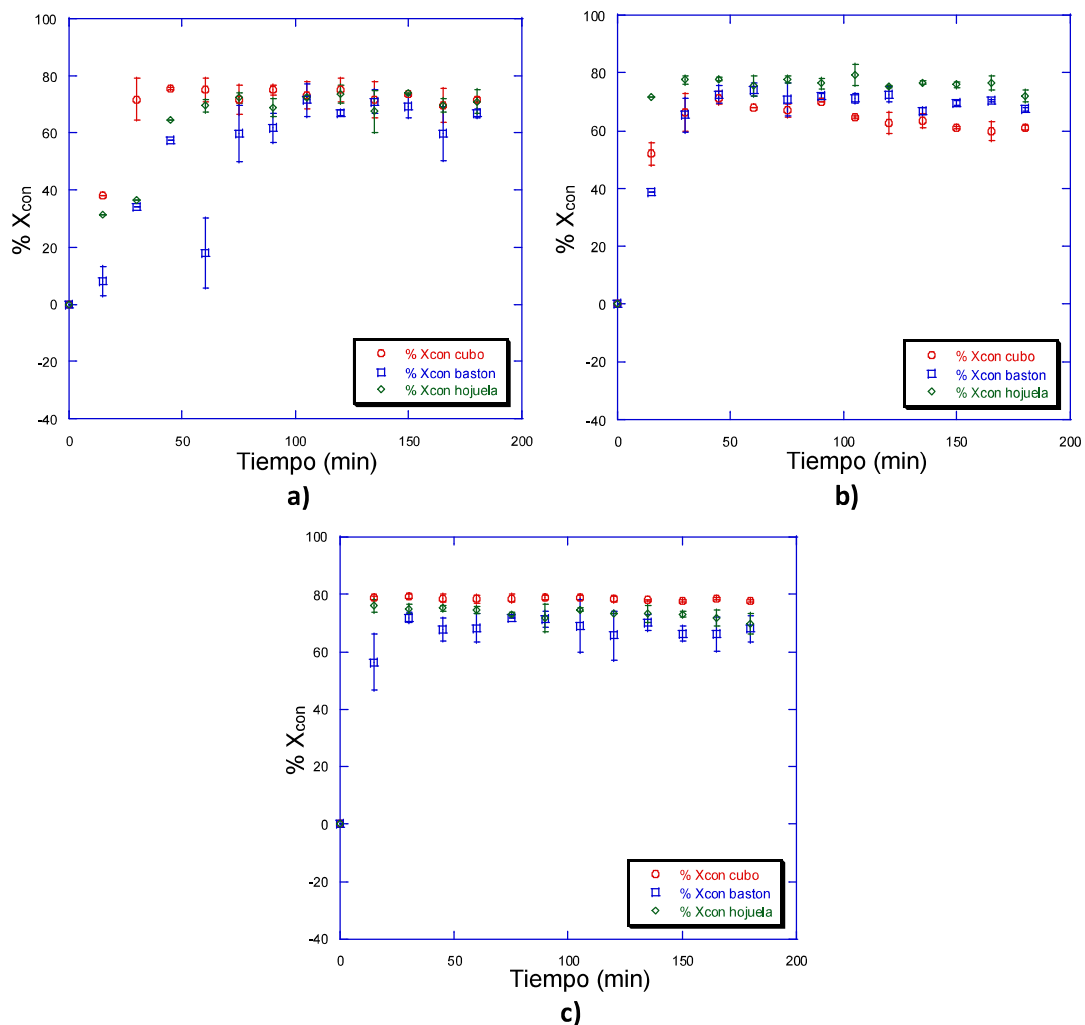


**Figura 3.6** Evolución de la ultracongelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa: a) -40 °C, b) -60 °C y c) -80 °C.

Esto es posiblemente debido a que el alto nivel de enfriamiento permite una

nucleación uniforme y rápida a través del volumen de la muestra; la congelación rápida, por ejemplo con nitrógeno líquido, permite altas velocidades de congelación inclusive en el centro del producto (Otero *et al.*, 2000). Cabe destacar que entre las tres distintas formas de las muestras sin pretratamiento no existió diferencia significativa en general a  $-40$ ,  $-60$  y  $-80$  °C.

La evolución de la cantidad de agua congelable para las diferentes condiciones de operación ( $-40$ ,  $-60$  y  $-80$  °C) en las tres distintas formas de papa con pretratamiento se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Evolución de la ultracongelación del agua en cubos, bastones y hojuelas de papa pretratada: a)  $-40$  °C, b)  $-60$  °C y c)  $-80$  °C.

Se puede observar que en los experimentos con pretratamiento a las temperaturas de -40, -60 y -80 °C existió un efecto similar de las variables sobre el  $X_{con}$  que en los experimentos sin pretratamiento. Sin embargo, se pudo observar que el pretratamiento interactuó para que la forma de la papa tuviera influencia en cuanto a la evolución del porcentaje del  $X_{con}$  y presentara diferencia significativa, siendo a -60 °C la hojuela la que alcanzó el máximo nivel de ésta a -60 °C con un 72.08% y el cubo a -80 °C con 77.87%.

### **3.3.2. Incremento de volumen de la papa durante el proceso de ultracongelación**

El proceso de congelación comienza en áreas con alta actividad de agua y por lo tanto una temperatura de congelación alta produciendo un punto de núcleos de cristalización o el inicio de congelación. Este fenómeno causa un incremento en la tensión superficial (hielo-agua) que atrae agua líquida, produciendo una acumulación de hielo en específicas áreas del tejido. En caso de la papa, la acumulación del hielo ocurre dentro de las células, causando un incremento volumétrico por la congelación y por el transporte interno de agua, produciendo crecimiento de las células con membrana y ruptura de la lamela media (Cuibus *et al.*, 2013).

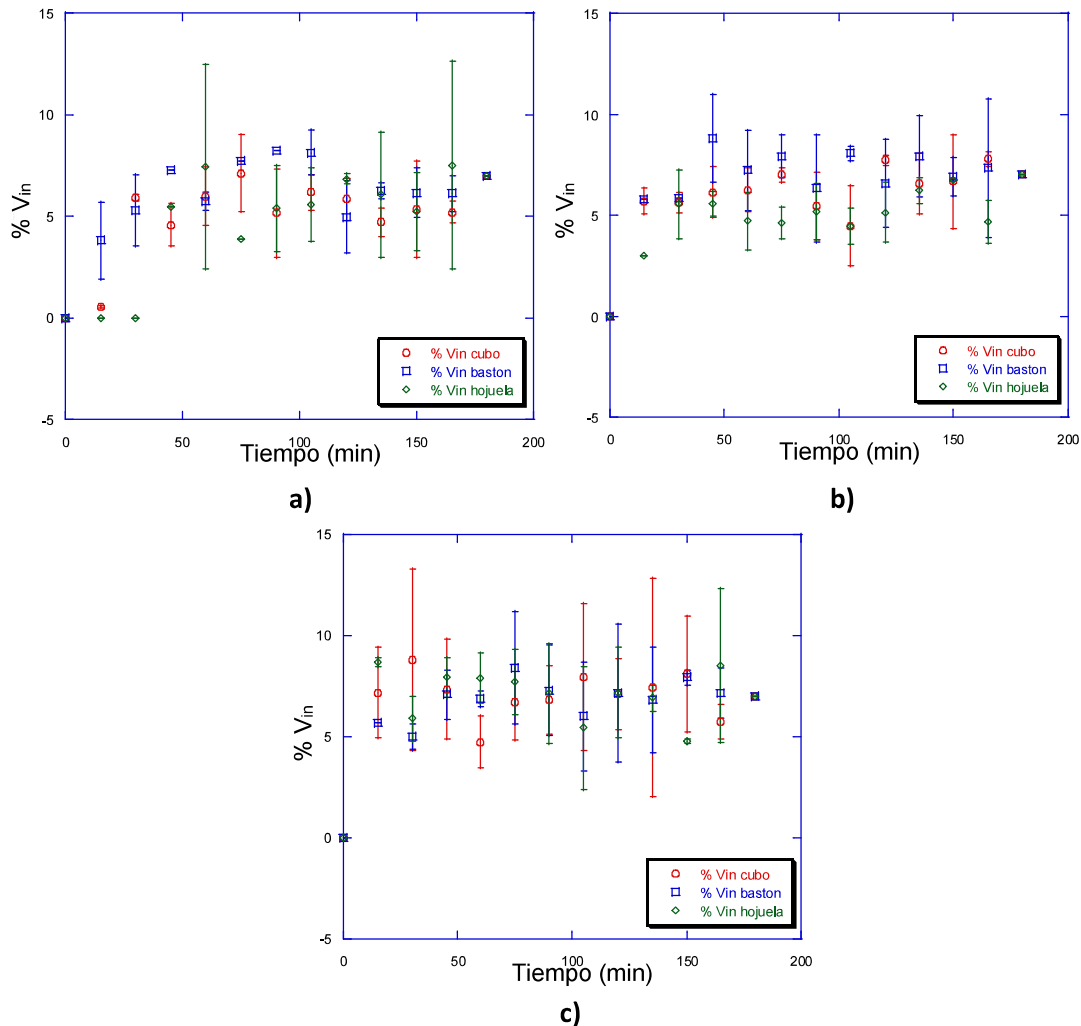
De acuerdo a lo anterior, la evolución del incremento volumétrico ( $V_{in}$ ) fue estudiada durante el proceso de ultracongelación de papa, empleando la metodología de la Sección 2.5.8, siendo posible la observación del cambio de volumen durante el proceso de cristalización del agua durante la congelación rápida. Para el cubo, el bastón y la hojuela, el volumen inicial fue de 1cm<sup>3</sup>, 7 cm<sup>3</sup> y 3.926 cm<sup>3</sup>, respectivamente.

#### **3.3.2.1. Curva de evolución de incremento de volumen**

El efecto de las condiciones de ultracongelación sobre el  $V_{in}$  se presenta en las Figuras 3.8 y 3.9. La Figura 3.8 muestra la evolución del incremento de volumen



durante el proceso de ultracongelación a  $-40$ ,  $-60$  y  $-80$  °C, para las tres diferentes formas sin pretratamiento.



**Figura 3.8** Evolución de  $V_{in}$  de cubos, bastones y hojuelas de papa durante el proceso de ultracongelación a: a)  $-40$  °C, b)  $-60$  °C y c)  $-80$  °C.

De acuerdo a los análisis realizados se observó que las muestras en forma de hojuela empiezan a alcanzar su máximo  $V_{in}$  (aproximado a 7%) los 60 minutos a  $-40$  °C, y la forma de cubo y bastón a partir de los 75 minutos, sin presentar diferencias significativas entre las diferentes formas, presentando todas ellas un incremento semejante al 7%, al final del proceso de congelación rápida (Figura 3.8a). El máximo  $V_{in}$  (alrededor al 7%) para las tres formas congeladas a  $-60$  °C se empezó a

presentar a partir de los 45 minutos (Figura 3.8b) y para las muestras congeladas a  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  a partir del minuto 15 (Figura 3.8c), presentando al final del proceso un incremento similar al 7%.

Resultados similares fueron obtenidos por Cuibus *et al.* (2013), en los que en una congelación de papa a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , reportaron que después de los 40 minutos del proceso de congelación las muestras siguen aumentando de tamaño, alcanzando su máximo incremento parcial ( $1.07\text{ cm}^3$ ) a los 80 minutos, por lo que la formación del hielo es importante hasta ese momento. Las temperaturas más bajas utilizadas en este proyecto ( $-40$ ,  $-60$  y  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pudieron ser una influencia para que se obtuviera un máximo incremento volumétrico (semejante al 7%) antes de los 80 minutos.

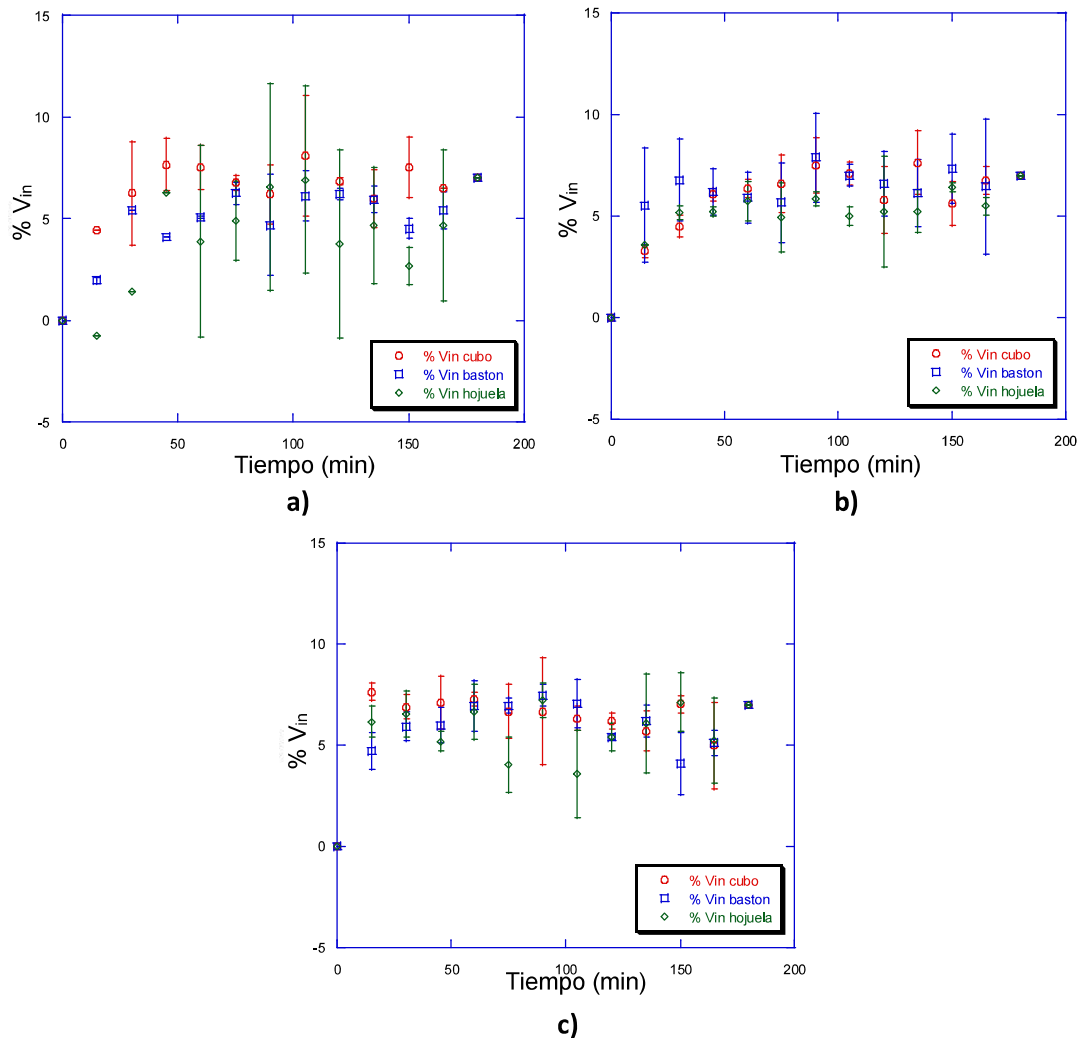
El incremento final obtenido de 7% en las distintas formas a las distintas temperaturas es aceptable puesto que como se mencionó previamente, la mayoría de los alimentos y especímenes vivos se expanden en la congelación en menor medida por la composición de los mismos que el agua pura (Zaritzky, 2010), siendo el incremento volumétrico de esta última de 9% a los  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Alvarez y Canet, 1997; Zaritzky, 2010; Pham, 2016).

El  $V_{in}$  se ve reflejado cuando el agua se congela, puesto que en relación con las curvas de evolución de ultracongelación sin pretratamiento, se observó que cuando se alcanzaba un máximo porcentaje de  $X_{con}$  (alrededor de 70%) simultáneamente se logró alcanzar un máximo porcentaje de  $V_{in}$  (próximo a 7%).

La Figura 3.9 presenta la evolución del incremento de volumen para cubos, bastones y hojuelas pretratados a las distintas condiciones de operación ( $-40$ ,  $-60$  y  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Se puede observar que para las muestras a la temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.9a),  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.9b) y  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.9c) el comportamiento del  $V_{in}$  en los experimentos con pretratamiento fue similar al de los experimentos sin pretratamiento, sin presentar diferencia significativa en general las formas a lo largo del proceso y alcanzando también al final de éste un valor próximo al 7%. Sin

embargo, a la temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la forma de hojuela mostró un comportamiento inestable y un encogimiento de  $0.76\%$  a los 15 minutos del proceso de ultracongelación, efecto que pudo haber sido favorecido por el pretratamiento al que fueron sometidas las muestras.



**Figura 3.9** Evolución de  $V_{in}$  de cubos, bastones y hojuelas de papa con pretratamiento durante el proceso de ultracongelación a: a)  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , b)  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y c)  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Resultados similares fueron reportados por Alvarez y Canet (1997) y McKellar *et al.* (2009) señalando que tanto la papa entera como en forma de cilindro (2.5 cm de diámetro y 1 cm de largo) o forma de hueso (7.5 de largo y 2 cm de ancho) se

encogieron al llegar por debajo de los 0 °C, y conforme a que la congelación fue progresando, la expansión del alimento fue tomando lugar.

Lo anterior puede ser atribuido a que el agua se expande durante la ultracongelación, sin embargo, la mayoría de los demás constituyentes del alimento se contraen conforme la temperatura se va reduciendo, esto implica un comportamiento del incremento volumétrico no uniforme (Zaritzky, 2010).

De igual manera, a medida que se alcanzaron los máximos niveles de  $X_{con}$  (Sección 3.3.1.1), paralelamente se alcanzaron los máximos porcentajes del  $V_{in}$  en las formas de la papa.

### **3.3.3. Comparación y análisis de color de la papa fresca y ultracongelada**

La medición de color de los productos alimenticios, ha sido utilizada como una medida indirecta de otros atributos de calidad, tales como el sabor y el contenido de pigmentos puesto que es más simple, rápido y está correlacionado de manera adecuada con otras propiedades fisicoquímicas (Pathare *et al.*, 2013).

Con el fin de evaluar el color al finalizar el proceso de ultracongelación, respecto al estándar de la papa fresca, se obtuvieron los parámetros de color **L**, **a** y **b** de las papas congeladas de acuerdo a la metodología planteada en la Sección 2.5.9, mostrados en la Tabla 3.4. Los valores obtenidos de la papa fresca empleada fueron: **L**= 31.58, **a**= 0.33 y **b**= 8.12.

El parámetro de luminosidad (**L**) para los diversos experimentos se encuentra en la Tabla 3.4. De acuerdo a la prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ) dicho parámetro presentó diferencias significativas en la mayoría de los tratamientos respecto al parámetro del producto inicial, debido a que los valores mostraron un incremento de hasta un 73%. Cabe destacar que los menores valores obtenidos fueron presentados por la forma de hojuelas a -40 y -60 °C con y sin pretratamiento, siendo la forma de hojuela a -60

°C sin pretratamiento, el único experimento que no mostró diferencia significativa con respecto a la luminosidad de la papa fresca.

**Tabla 3.4** Parámetros de color **L**, **a**, **b** y **ΔE** para los distintos experimentos de ultracongelación.

Exp	T <sub>uc</sub> (°C)	t <sub>a</sub>	Pret	L	a	b	ΔE
1	-40	C	S/AC	49.26 <sup>5.02</sup>	0.75 <sup>1.94</sup>	11.635 <sup>0.728</sup>	18.89 <sup>4.83</sup>
2	-40	C	C/AC	49.23 <sup>2.38</sup>	-0.180 <sup>0.523</sup>	13.04 <sup>1.68</sup>	19.45 <sup>2.96</sup>
3	-40	B	S/AC	47.64 <sup>2.37</sup>	0.070 <sup>0.170</sup>	14.11 <sup>2.90</sup>	19.04 <sup>4.32</sup>
4	-40	B	C/AC	48.74 <sup>1.273</sup>	-0.165 <sup>0.247</sup>	13.170 <sup>0.580</sup>	19.06 <sup>1.45</sup>
5	-40	H	S/AC	41.42 <sup>5.86</sup>	-1.085 <sup>0.559</sup>	9.89 <sup>2.22</sup>	11.95 <sup>4.43</sup>
6	-40	H	C/AC	44.895 <sup>1.322</sup>	-1.370 <sup>0.438</sup>	10.895 <sup>0.997</sup>	14.735 <sup>0.813</sup>
7	-60	C	S/AC	50.56 <sup>1.42</sup>	0.120 <sup>0.297</sup>	10.32 <sup>3.00</sup>	20.14 <sup>1.53</sup>
8	-60	C	C/AC	52.73 <sup>6.75</sup>	-0.235 <sup>0.007</sup>	9.475 <sup>0.672</sup>	21.91 <sup>6.52</sup>
9	-60	B	S/AC	53.06 <sup>3.64</sup>	-0.075 <sup>0.361</sup>	10.24 <sup>1.160</sup>	22.25 <sup>3.49</sup>
10	-60	B	C/AC	51.39 <sup>1.73</sup>	0.040 <sup>0.467</sup>	11.02 <sup>3.58</sup>	21.10 <sup>2.12</sup>
11	-60	H	S/AC	37.00 <sup>1.259</sup>	-0.650 <sup>0.240</sup>	6.26 <sup>0.113</sup>	7.67 <sup>0.976</sup>
12	-60	H	C/AC	46.61 <sup>2.92</sup>	-0.600 <sup>0.113</sup>	7.335 <sup>1.096</sup>	16.43 <sup>3.27</sup>
13	-80	C	S/AC	51.215 <sup>0.700</sup>	0.085 <sup>0.0778</sup>	10.58 <sup>1.43</sup>	20.57 <sup>0.552</sup>
14	-80	C	C/AC	52.090 <sup>0.537</sup>	-0.125 <sup>0.219</sup>	9.955 <sup>0.544</sup>	21.325 <sup>0.516</sup>
15	-80	B	S/AC	54.36 <sup>1.89</sup>	0.965 <sup>0.106</sup>	10.64 <sup>0.396</sup>	23.49 <sup>1.75</sup>
16	-80	B	C/AC	54.825 <sup>1.223</sup>	0.515 <sup>0.530</sup>	10.15 <sup>0.297</sup>	23.915 <sup>1.153</sup>
17	-80	H	S/AC	49.110 <sup>0.665</sup>	-0.875 <sup>0.219</sup>	8.625 <sup>1.096</sup>	18.62 <sup>0.82</sup>
18	-80	H	C/AC	48.295 <sup>0.276</sup>	-0.970 <sup>0.311</sup>	7.135 <sup>0.0495</sup>	18.2 <sup>0.255</sup>

Resultados similares se han observado en otros estudios del proceso de congelación de productos agrícolas, empleando velocidades de congelación lenta (hasta -20 °C) y rápida (menores de -20 °C y/o métodos criogénicos). El incremento en los valores del parámetro **L** se pueden atribuir a la formación de cristales de hielo pequeños en la superficie del producto (Holzwarth *et al.*, 2012). Bartolome *et al.* (1996) realizaron una comparación entre congelación lenta y congelación rápida de piezas pequeñas de piña (-18 y -50 °C), así como Holzwarth *et al.* (2012) estudiaron ambos procesos en fresa (-20 °C y N líquido). Los investigadores observaron que las muestras sometidas a congelaciones rápidas presentaron valores mayores del parámetro **L** en

---

comparación a los valores obtenidos en la congelación lenta. Así mismo, Cano y Marín (1992), cuya investigación empleó una congelación rápida (-40 °C) en hojuelas de kiwi, reportaron un ligero incremento en la luminosidad.

En otros métodos de conservación donde se involucra el proceso de congelación, el efecto del incremento en el parámetro **L** también fue observado, pues se encontró presente en muestras de ciruela, zanahoria y espárragos liofilizados, en las cuales los valores de luminosidad fueron mayores cuando se empleó en su proceso una congelación rápida en lugar de una congelación lenta (Muñoz-López, 2014; Reyes *et al.*, 2008; Jokic *et al.*, 2009).

El parámetro **a** que representa la tonalidad roja-verde presentó una disminución de su valor (Tabla 3.4) en la mayoría de los tratamientos y, de acuerdo con la prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ) no presentó diferencia significativa en los diferentes experimentos con y sin pretratamiento respecto al producto fresco, de tal manera que ninguno de los factores afectaron directamente a las respuestas obtenidas; sin embargo, la forma de hojuela presentó los menores valores del parámetro **a**. También se observó que el pretratamiento con ácido cítrico no afectó a las muestras finales.

En contraste, Cano y Marín (1992), reportaron un aumento (del 26.4%) en el parámetro **a** en el kiwi sometido a un proceso de congelación rápida a -40 °C, mostrando diferencia significativa con respecto al fruto fresco. De igual manera, Bartolome *et al.* (1996) reportaron un ligero incremento (del 9.8%) en el parámetro **a** en la piña congelada de manera rápida a -50 °C, presentando diferencia significativa con respecto a la piña fresca y a la velocidad de congelación.

Con respecto al parámetro **b** (tonalidad amarilla-azul), la mayoría de los experimentos mostraron un ligero incremento en su valor (Tabla 3.4). El análisis estadístico con prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ) indicó que la forma de bastón con y sin tratamiento a la temperatura de -40 °C presentaron diferencia significativa respecto al producto inicial, lo cual indica que esas condiciones de forma y temperatura

favorecieron una tonalidad más amarilla, mientras que los demás experimentos no tuvieron diferencia significativa.

Diferencias significativas fueron también encontradas por Cano y Marín (1992) durante el proceso de congelación rápida de hojuelas de kiwi a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , quienes reportaron un ligero aumento en los valores del parámetro **b** mostrando diferencia significativa con respecto al alimento fresco.

La diferencia de color ( $\Delta E$ ) evaluada estadísticamente (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ) indicó que existió diferencia significativa entre la mayoría de los valores resultantes de los experimentos con respecto al color inicial de la muestra fresca, obteniendo la mayor diferencia de color en la muestra (23.915) que estuvo bajo las condiciones de temperatura de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , forma de bastón y con pretratamiento, mientras que la muestra que presentó la menor diferencia de color en la muestra (7.670) y que no mostró diferencia significativa fue la sometida a la temperatura de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , forma de hojuela y sin pretratamiento.

#### **3.3.4. Características finales de la papa ultracongelada**

En la Tabla 3.5 se muestran los valores finales de los experimentos realizados utilizando el diseño  $3 \times 3 \times 2$ . El análisis estadístico con prueba de Tukey ( $\alpha= 0.05$ ) aplicado a los resultados finales de los parámetros de  $X_{\text{con}}$  indicó que hubo diferencia significativa entre los experimentos, obteniendo la mayor cantidad de agua congelable el experimento 14 (77.87%), cuando se utilizó la temperatura de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la forma de cubo con pretratamiento, mientras que la muestra que presentó menor porcentaje (57.02%) fue la resultante del experimento 3 correspondiente a la muestra congelada a una temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en la forma de bastón y sin pretratamiento.

El análisis de varianza con prueba de Tukey ( $\alpha= 0.05$ ) para los resultados finales de  $V_{\text{in}}$  reveló que no existió diferencia significativa entre los tratamientos, indicando que ni uno de los factores afectó directamente las respuestas obtenidas.

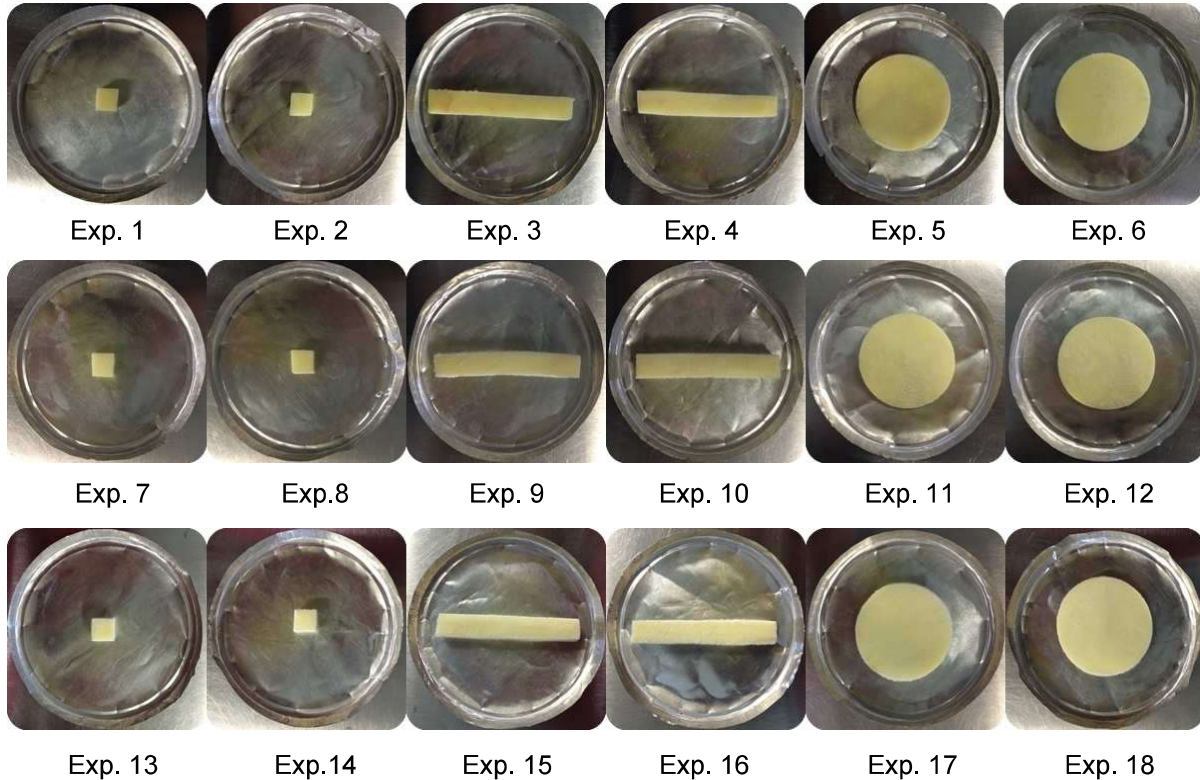
La  $\Delta E$  de acuerdo al análisis estadístico (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ) mostró diferencias significativas entre la mayoría de los experimentos respecto al estándar del producto inicial, aunque el parámetro **a** no presentó diferencias significativas al final del proceso debido a que no existió pardeamiento enzimático, el parámetro **b** sí mostró diferencia significativa en dos tratamientos en forma de bastón y el parámetro **L** presentó en la mayoría de los experimentos diferencia significativa, ya que mostró un incremento en su valor atribuido a la formación de pequeños cristales de hielo en la superficie del producto (Holzwarth *et al.*, 2012), encontrándose al igual que en el proceso de congelación, que el parámetro **L** tuvo la mayor influencia sobre los valores de  $\Delta E$ . Las formas de hojuela a las tres temperaturas, con y sin pretratamiento, presentaron los valores más bajos obtenidos ( $\Delta E=7.67-18.63$ ).

**Tabla 3.5** Resultados experimentales finales de la papa ultracongelada.

Exp	T <sub>uc</sub> (°C)	t <sub>a</sub>	Pret	X <sub>con</sub> (%)	V <sub>in</sub> (%)	$\Delta E$
1	-40	C	S/AC	67.54 <sup>0.115</sup>	7.000 <sup>0.0001</sup>	18,89 <sup>4.83</sup>
2	-40	C	C/AC	71.46 <sup>0.760</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	19,45 <sup>2.96</sup>
3	-40	B	S/AC	57.20 <sup>2.61</sup>	7.001 <sup>0.001</sup>	19,04 <sup>4.32</sup>
4	-40	B	C/AC	66.91 <sup>1.59</sup>	7.001 <sup>0.001</sup>	19,06 <sup>1.45</sup>
5	-40	H	S/AC	65.23 <sup>2.87</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	11,95 <sup>4.43</sup>
6	-40	H	C/AC	70.92 <sup>4.16</sup>	7.000 <sup>0.0003</sup>	14,735 <sup>0.813</sup>
7	-60	C	S/AC	67.73 <sup>3.38</sup>	7.001 <sup>0.0004</sup>	20,14 <sup>1.53</sup>
8	-60	C	C/AC	61.04 <sup>0.97</sup>	7.000 <sup>0.0005</sup>	21,91 <sup>6.52</sup>
9	-60	B	S/AC	66.35 <sup>4.12</sup>	7.001 <sup>0.0003</sup>	22,25 <sup>3.49</sup>
10	-60	B	C/AC	67.43 <sup>0.55</sup>	7.002 <sup>0.001</sup>	21,10 <sup>2.12</sup>
11	-60	H	S/AC	66.86 <sup>2.42</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	7,67 <sup>0.976</sup>
12	-60	H	C/AC	72.08 <sup>1.98</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	16,43 <sup>3.27</sup>
13	-80	C	S/AC	65.14 <sup>6.76</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	20,57 <sup>0.552</sup>
14	-80	C	C/AC	77.87 <sup>0.45</sup>	7.000 <sup>0.0001</sup>	21,325 <sup>0.516</sup>
15	-80	B	S/AC	66.39 <sup>5.03</sup>	6,999 <sup>0.000</sup>	23,49 <sup>1.75</sup>
16	-80	B	C/AC	68.04 <sup>4.60</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	23,915 <sup>1.153</sup>
17	-80	H	S/AC	71.07 <sup>0.410</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	18,62 <sup>0.82</sup>
18	-80	H	C/AC	69.86 <sup>3.54</sup>	7.000 <sup>0.000</sup>	18,2 <sup>0.255</sup>



En la Figura 3.10, se muestra el color final de las distintas muestras de papa ultracongelada, pudiendo observar lo anteriormente descrito con respecto a los parámetros de color.



**Figura 3.10** Muestras de papa ultracongelada a diferentes condiciones.

### **3.4. Cálculo de propiedades térmicas al final del proceso de congelación y ultracongelación**

Las propiedades térmicas del tubérculo (papa) fueron determinadas con los modelos matemáticos establecidos en la Sección 2.7.

#### **3.4.1. Conductividad térmica (k)**

Alrededor del punto de congelación, la temperatura tiene un fuerte impacto en la conductividad térmica, pues cambios dramáticos ocurren en la naturaleza física de

los alimentos mientras se lleva a cabo la congelación o la descongelación (Serpil y Servet, 2006).

De acuerdo al modelo de Levi de 1981 (referido por Fricke y Becker, 2001), descrito en la Sección 2.7.1, y considerando que el componente 1 es el agua no congelada, y el componente 2 es el hielo, se obtuvieron las siguientes conductividades térmicas al final de los experimentos del proceso de congelación (Tabla 3.6) y ultracongelación (Tabla 3.7).

**Tabla 3.6** Conductividades térmicas obtenidas para los diferentes experimentos de congelación.

Exp	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$t_a$	Pret	$X_{\text{con}}(\%)$	$k(\text{W/m K})$
0	25	Ninguno	Ninguno	0	0.5415 <sup>0.010</sup>
1	-5	C	S/AC	45.047 <sup>0.000</sup>	1.285 <sup>0.000</sup>
2	-5	C	C/AC	66.280 <sup>6.148</sup>	1.810 <sup>0.176</sup>
3	-5	B	S/AC	54.378 <sup>2.426</sup>	1.535 <sup>0.059</sup>
4	-5	B	C/AC	63.913 <sup>0.00</sup>	1.739 <sup>0.000</sup>
5	-5	H	S/AC	59.081 <sup>0.000</sup>	1.610 <sup>0.000</sup>
6	-5	H	C/AC	62.407 <sup>0.000</sup>	1.698 <sup>0.000</sup>
7	-10	C	S/AC	73.957 <sup>2.057</sup>	2.066 <sup>0.067</sup>
8	-10	C	C/AC	72.902 <sup>2.477</sup>	2.032 <sup>0.080</sup>
9	-10	B	S/AC	46.669 <sup>0.637</sup>	1.320 <sup>0.013</sup>
10	-10	B	C/AC	60.279 <sup>4.534</sup>	1.656 <sup>0.123</sup>
11	-10	H	S/AC	60.236 <sup>4.247</sup>	1.738 <sup>0.120</sup>
12	-10	H	C/AC	71.360 <sup>0.000</sup>	1.982 <sup>0.000</sup>
13	-15	C	S/AC	66.742 <sup>0.149</sup>	1.861 <sup>0.004</sup>
14	-15	C	C/AC	66.331 <sup>5.236</sup>	1.852 <sup>0.162</sup>
15	-15	B	S/AC	50.901 <sup>11.819</sup>	1.437 <sup>0.287</sup>
16	-15	B	C/AC	65.757 <sup>7.779</sup>	1.838 <sup>0.238</sup>
17	-15	H	S/AC	66.909 <sup>0.166</sup>	1.867 <sup>0.005</sup>
18	-15	H	C/AC	70.799 <sup>3.449</sup>	1.993 <sup>0.113</sup>

Debido a que los modelos de Choi y Okos de 1986 (referido por ASHRAE, 2006) para los componentes del alimento (proteínas, grasas, carbohidratos y cenizas) también involucrados en la predicción de dicha propiedad térmica, corresponden únicamente al intervalo de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , las ecuaciones no son

válidas para las temperaturas estudiadas de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que no son reportadas en esta investigación.

**Tabla 3.7** Conductividades térmicas obtenidas para los diferentes experimentos de ultracongelación.

Exp	$T_{uc} (^{\circ}\text{C})$	$t_a$	Pret	$X_{con} (\%)$	$k (\text{W/m K})$
0	25	Ninguno	Ninguno	0	$0.5415^{0.010}$
1	-40	C	S/AC	$67.54^{0.115}$	$2.050^{0.004}$
2	-40	C	C/AC	$71.46^{0.760}$	$2.209^{0.031}$
3	-40	B	S/AC	$57.20^{2.61}$	$1.673^{0.087}$
4	-40	B	C/AC	$66.91^{1.59}$	$2.025^{0.062}$
5	-40	H	S/AC	$65.23^{2.87}$	$1.962^{0.109}$
6	-40	H	C/AC	$70.92^{4.16}$	$2.189^{0.172}$

El proceso de congelación provocó un incremento en la conductividad térmica de los alimentos, debido a la fuerte dependencia del modelo a la fracción másica de hielo y agua no congelada presente en los mismos, se obtuvieron conductividades térmicas desde 1.285 hasta 2.209 W/m K, y se observó que los experimentos con una cantidad superior a 60% de agua congelable presentaron conductividades térmicas cercanas a la conductividad térmica del hielo (2.24 W/m K) (Serpil y Servet, 2006), determinándose que a mayor cantidad de agua congelable (hielo) en el alimento y a menor temperatura, mayor fue la conductividad térmica resultante.

Los valores finales de  $k$  para el proceso de congelación fueron analizados estadísticamente (Dunnnett  $\alpha = 0.05$ ) encontrando que existió diferencia significativa de los experimentos con respecto a la conductividad térmica del alimento fresco. El experimento 7 obtuvo el mayor valor (2.066 W/m K) y el experimento 1 el menor (1.285 W/m K). De la misma manera, para el proceso de ultracongelación el análisis estadístico con prueba de Dunnnett ( $\alpha = 0.05$ ) reveló que existió diferencia significativa entre la  $k$  final de la papa a las diferentes condiciones de operación con respecto al producto fresco, siendo el experimento 2 el que presentó el mayor valor obtenido (2.209 W/m K) y el experimento 3 el menor valor (1.673 W/m K).

### 3.4.2. Calor específico (Cp)

Respecto al modelo de Schwartzberg de 1976 (referido por Fricke y Becker, 2001), descrito en la Sección 2.7.2, y considerando el componente 1 como el agua no congelada y el componente 2 al hielo, se obtuvieron los siguientes calores específicos al final de los experimentos del proceso de congelación (Tabla 3.8) y ultracongelación (Tabla 3.9). Como se mencionó anteriormente, los modelos desarrollados por Choi y Okos en 1986 (referido por ASHRAE, 2006) involucrados en la predicción de las propiedades térmicas del alimento son inválidos para las temperaturas estudiadas de -60 y -80 °C.

En la Tabla 3.8 y 3.9 se observa claramente que, independientemente de la forma y del pretratamiento, el calor específico aparente resultó ser el mismo para los experimentos a la misma temperatura, debido a que el modelo empleado está en función de la misma. Por lo que estadísticamente para el proceso de congelación y ultracongelación (prueba Dunnett  $\alpha=0.05$ ) los conjuntos de experimentos a la misma temperatura mostraron diferencia significativa con respecto al Cp de la papa fresca.

En la presente investigación la papa fresca con un 81.505% de humedad presentó a 25 °C un calor específico de 3.670 kJ/kg K, el cual fue semejante a los valores reportados por Tavman *et al.* (2003) para papa con un 82% de humedad en un intervalo de temperaturas de 20 a 60 °C un valor medio de 3.130 kJ/kg K, así como ASHRAE (2006) reportó para papa con 78.96% de humedad, por encima del punto de congelación un calor específico de 3.67 kJ/kg K. A temperaturas inferiores al punto de congelación de la papa Tavman *et al.* (2003) reportaron un calor específico aparente de 1.575 kJ/kg K como valor medio en un intervalo de temperaturas de -60 a -25 °C y ASHRAE (2006) un valor de 1.93 kJ/kg K, observando que la reducción de calor específico aparente es análoga con la disminución de dicha propiedad térmica obtenida en esta investigación con resultados desde 15.582 kJ/kg K a -5 °C hasta 0.534 a -40 °C.

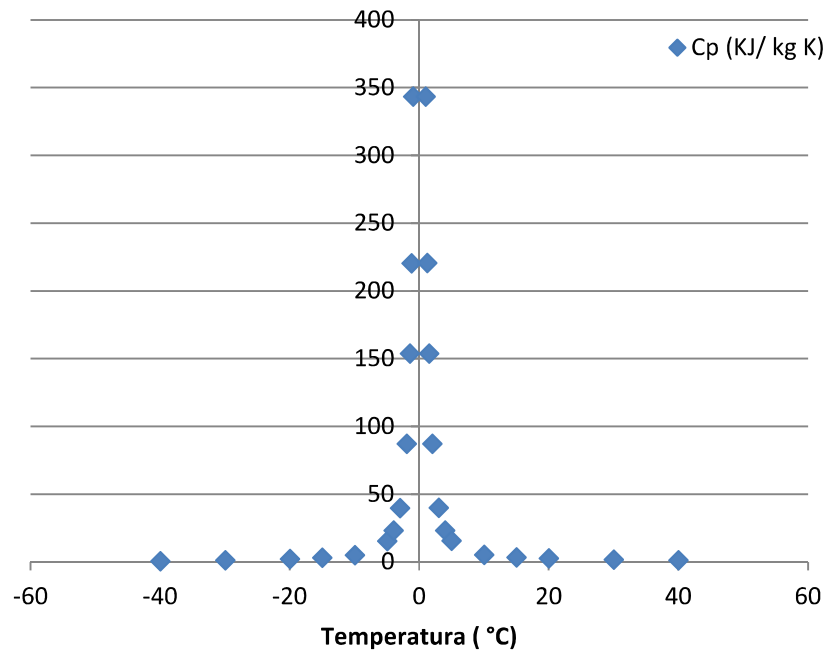
**Tabla 3.8** Calor específico aparente para los diferentes experimentos de congelación.

<b>Exp</b>	<b>T<sub>c</sub>(°C)</b>	<b>t<sub>a</sub></b>	<b>Pret</b>	<b>Cp (kJ/kg K)</b>
<b>0</b>	25	Ninguno	Ninguno	3.670
<b>1</b>	-5	C	S/AC	15.582
<b>2</b>	-5	C	C/AC	15.582
<b>3</b>	-5	B	S/AC	15.582
<b>4</b>	-5	B	C/AC	15.582
<b>5</b>	-5	H	S/AC	15.582
<b>6</b>	-5	H	C/AC	15.582
<b>7</b>	-10	C	S/AC	5.229
<b>8</b>	-10	C	C/AC	5.229
<b>9</b>	-10	B	S/AC	5.229
<b>10</b>	-10	B	C/AC	5.229
<b>11</b>	-10	H	S/AC	5.229
<b>12</b>	-10	H	C/AC	5.229
<b>13</b>	-15	C	S/AC	3.184
<b>14</b>	-15	C	C/AC	3.184
<b>15</b>	-15	B	S/AC	3.184
<b>16</b>	-15	B	C/AC	3.184
<b>17</b>	-15	H	S/AC	3.184
<b>18</b>	-15	H	C/AC	3.184

**Tabla 3.9** Calor específico aparente para los diferentes experimentos de ultracongelación.

<b>Exp</b>	<b>T<sub>uc</sub>(°C)</b>	<b>t<sub>a</sub></b>	<b>Pret</b>	<b>Cp (kJ/kg K)</b>
<b>0</b>	25	Ninguno	Ninguno	3.670
<b>1</b>	-40	C	S/AC	0.534
<b>2</b>	-40	C	C/AC	0.534
<b>3</b>	-40	B	S/AC	0.534
<b>4</b>	-40	B	C/AC	0.534
<b>5</b>	-40	H	S/AC	0.534
<b>6</b>	-40	H	C/AC	0.534

En la Figura 3.11 se presenta el comportamiento mostrado por el calor específico aparente en la papa a diversas temperaturas.



**Figura 3.11** Calor específico aparente de la papa a diferentes temperaturas.

Se observó que a menor temperatura de congelación ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), menor fue el calor específico aparente ( $0.534\text{ kJ/kg K}$ ), mientras que a mayor temperatura ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) el calor específico aumentó drásticamente ( $15.582\text{ kJ/kg K}$ ) para posteriormente disminuir su valor ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C_p=3.670\text{ kJ/kg K}$ ). Dan-Wen (2012) señala que durante la congelación existe un rápido descenso en el calor específico aparente después de que se alcanza la temperatura inicial de congelación debido a que la mayor cantidad del calor latente de fusión del agua es removido del alimento en la región cercana al punto inicial de congelación.

El calor específico aparente en alimentos congelados incrementa con el aumento de temperatura hasta que alcanza su máximo valor, siendo éste el cambio más dramático observado a temperaturas cercanas al punto de congelación. Después el valor disminuye para los alimentos no congelados conforme la temperatura aumenta más que la temperatura inicial de congelación (Tavman *et al.*, 2003; Dan-Wen, 2012).

### 3.5. Descongelación

La congelación no es adecuada para todos los alimentos, debido a que al ser descongelados pueden ser dañados por cambios químicos, físicos y microbiológicos que están asociados con la reducción de calidad, provocando en algunos casos pérdida de turgencia celular, flacidez, encogimiento y pérdida de textura (Boonsumrej *et al.*, 2007; Ayala *et al.*, 2014; James *et al.*, 2014), por lo cual la descongelación debe estar diseñada para minimizar el crecimiento microbiano, la liberación de agua, las pérdidas por evaporación y las reacciones de deterioro (Zaritzky, 2010).

Debido a ello, el proceso de descongelación fue evaluado como se mencionó en la Sección 2.6, teniendo como variables respuesta al final del proceso: humedad (X), actividad de agua ( $a_w$ ), color (**L**, **a**, **b** y  $\Delta E$ ) y cambio de volumen. De acuerdo a los resultados obtenidos en los procesos de congelación y ultracongelación, se decidió estudiar la descongelación para los experimentos realizados a la temperatura de congelación de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura de ultracongelación de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  porque dentro de las temperaturas que tuvieron mayores valores obtenidos de Xcon ( $-10$  y  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y  $-60$  y  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , véase Tablas 3.3 y 3.5), fueron las que menor demanda de energía requerían.

#### 3.5.1. Descongelación de la papa congelada

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos para las formas de la papa descongelada previamente sometida al proceso de congelación.

El análisis estadístico con prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ) indicó que no existió diferencia significativa en la X en los tratamientos con respecto a la X de la papa fresca, indicando que los factores en conjunto no afectaron directamente las respuestas obtenidas. Esta ligera pérdida de humedad, desde un 4.8% a un 16.5%, puede atribuirse al fenómeno de sinéresis, donde agua líquida formada en la

descongelación no es retenida por el tejido del alimento (Barreiro y Sandoval, 2006). Un valor superior de pérdida de X para productos sometidos a congelación lenta fue reportado por Lee *et al.* (2002) donde después de realizar una congelación de 20 horas a -18 °C y una descongelación de 4 horas a 25 °C, se obtuvo una pérdida de agua del 32% en las muestras de gel de almidón de papa dulce.

**Tabla 3.10** Características fisicoquímicas de papa descongelada después de la congelación.

Condiciones congelación				Parámetros después de descongelación					
Exp	T <sub>c</sub> (°C)	t <sub>a</sub>	Pret	X (%)	a <sub>w</sub>	Color			
						L	a	b	ΔE
Papa fresca				81.505	0.991	43.38	1.90	15.06	-
7	-10	C	S/AC	67.99 <sup>0.007</sup>	0.967 <sup>0.002</sup>	34.04 <sup>3.047</sup>	6.82 <sup>0.36</sup>	13.38 <sup>1.21</sup>	12.09 <sup>3.15</sup>
8	-10	C	C/AC	68.73 <sup>4.256</sup>	0.975 <sup>0.004</sup>	36.59 <sup>2.206</sup>	5.71 <sup>0.19</sup>	13.56 <sup>1.11</sup>	10.35 <sup>2.24</sup>
9	-10	B	S/AC	74.08 <sup>6.371</sup>	0.971 <sup>0.008</sup>	38.95 <sup>3.295</sup>	7.10 <sup>3.01</sup>	16.21 <sup>1.49</sup>	9.89 <sup>7.50</sup>
10	-10	B	C/AC	71.52 <sup>4.78</sup>	0.975 <sup>0.0007</sup>	43.91 <sup>0.197</sup>	2.73 <sup>0.098</sup>	16.24 <sup>1.78</sup>	3.25 <sup>3.08</sup>
11	-10	H	S/AC	77.52 <sup>6.873</sup>	0.985 <sup>0.002</sup>	31.87 <sup>4.928</sup>	5.56 <sup>0.707</sup>	11.35 <sup>1.53</sup>	14.07 <sup>5.86</sup>
12	-10	H	C/AC	75.52 <sup>2.89</sup>	0.984 <sup>0.0007</sup>	41.36 <sup>1.286</sup>	2 <sup>2.305</sup>	14.42 <sup>1.42</sup>	3.55 <sup>1.385</sup>

Otro parámetro a evaluar en la descongelación fue la actividad de agua (a<sub>w</sub>), la cual presentó una disminución en el alimento descongelado y con ello estadísticamente una diferencia significativa en los experimentos 10, 8, 9 y 7 con respecto al alimento fresco (Dunnett α= 0.05). Sin embargo, los experimentos 11 y 12 no mostraron diferencia significativa. Durante la descongelación, las formas de papa presentaron una a<sub>w</sub> cercana a 1, esto es atribuido a la alta cantidad de agua líquida contenida en la superficie del alimento (Delgado y Dan-Wen, 2007). Este incremento en la actividad de agua debido al derretimiento del hielo en los espacios extracelulares, provocó un flujo de agua a los espacios intracelulares y su posterior reabsorción por fibras deshidratadas (Leygonie *et al.*, 2012) recuperando con ello la disponibilidad de



ésta para intervenir en las reacciones de degradación del producto (Fennema, 1996; Badui, 2006).

Debido a que el color es una propiedad que determina la aceptación del producto por los consumidores, se realizó el análisis de color de la muestra descongelada. El parámetro de color **L** fue evaluado mediante un análisis estadístico (Dunnett  $\alpha=0.05$ ), el cual indicó una disminución de luminosidad de las muestras descongeladas en comparación con la papa fresca, siendo el experimento 7 y 11 los que presentaron una diferencia significativa con respecto al producto fresco.

Resultados similares fueron reportados en otros estudios donde se evaluaron el proceso de congelación y descongelación en productos agrícolas sobre su color, empleando congelación lenta y rápida, y diferentes tipos de descongelación: temperatura ambiente, baño de agua, horno de microondas y por alta presión (Holzwarth *et al.*, 2012; Wen *et al.*, 2015). En un estudio de descongelación de melón Hami previamente congelado, Wen *et al.* (2015) señalaron que la disminución de los valores del parámetro **L** es posiblemente debido a que la severa ruptura del tejido celular provocada por el prolongado tiempo de descongelación, generó la compartimentación de las enzimas y del sustrato desencadenando el pardeamiento enzimático que provocó la disminución del valor de dicho parámetro de color.

El parámetro **a** presentó un aumento en su valor respecto al alimento fresco, el análisis estadístico con prueba de Dunnett ( $\alpha=0.05$ ) señaló una diferencia significativa por parte de los experimentos 9 y 7 respecto a la papa fresca. Sin embargo, los experimentos 8, 10, 11 y 12 no presentaron diferencia significativa, indicando que ni uno de los factores afectó dichas respuestas.

Wen *et al.* (2015) observaron que los valores de **a** incrementaron para todas las muestras descongeladas de melón Hami, atribuyendo este fenómeno a la concentración del pigmento en la superficie de la fruta cuando las células de la fruta fueron dañadas y la savia de las células fue lixiviada durante la descongelación. Así mismo, Holzwarth *et al.* (2012) reportaron que después de la congelación

---

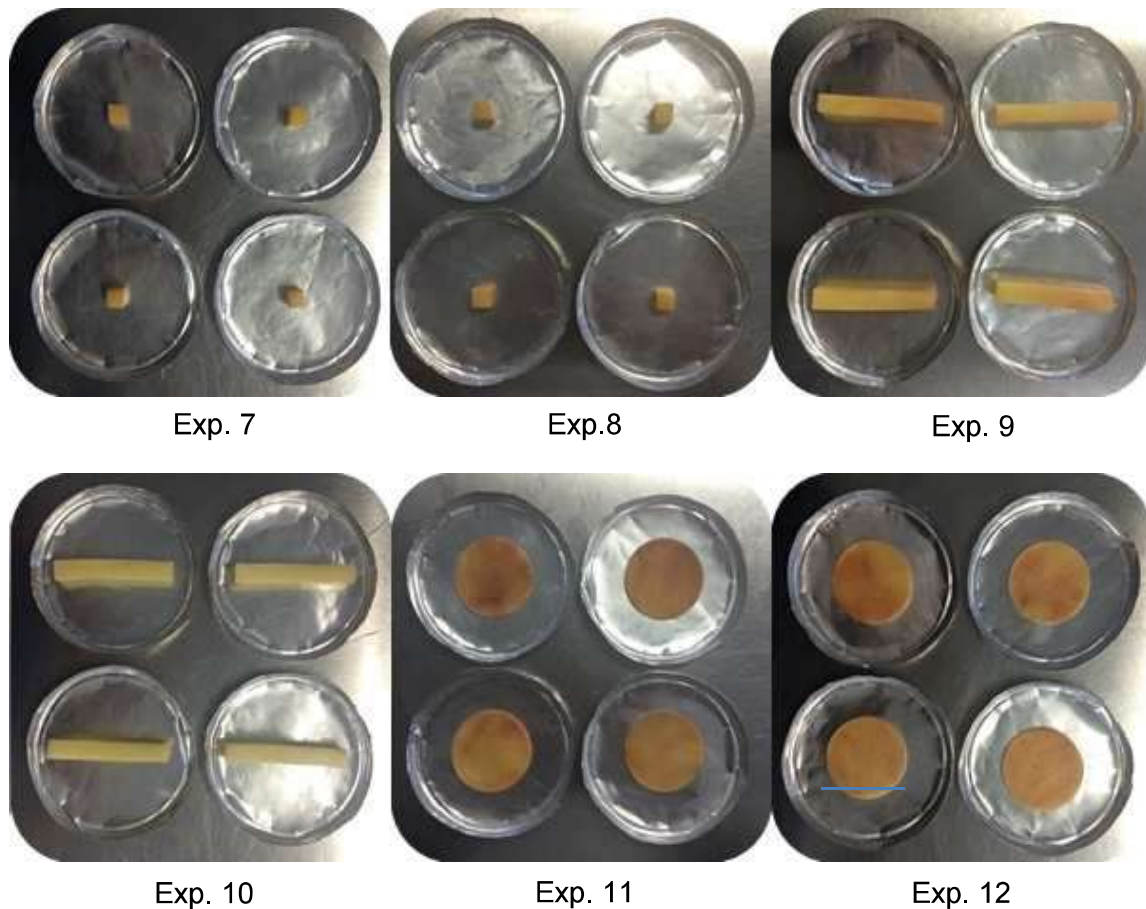
convencional, las muestras descongeladas de fresa mostraron un incremento en el parámetro **a**, fenómeno posiblemente atribuido a la difusión de los pigmentos desde el centro de la fruta hasta las capas celulares más externas por la ruptura de las paredes celulares.

Para términos de esta investigación, el incremento de **a** podría ser atribuido a los pigmentos marrones provocados por el pardeamiento enzimático, observando que las muestras sin pretratamiento presentaron los mayores valores del parámetro **a** que las muestras con pretratamiento, indicando que el ácido cítrico tuvo efectos positivos como agente antioxidante.

El parámetro **b** de las muestras descongeladas no presentó diferencia significativa (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ) con respecto al producto inicial, a pesar de haberse presentado en la mayoría de los experimentos una disminución en el valor de dicho parámetro. En contraste a los resultados obtenidos en este estudio, Wen *et al.* (2015) observaron que la mayoría de las muestras descongeladas de melón Hami presentaron un incremento en los valores del parámetro de color **b** en comparación al melón Hami fresco. De manera similar, Holzwarth *et al.* (2012) reportaron que para las muestras descongeladas de fresa con una previa congelación lenta, existió un incremento en los valores de **b** comparados con las muestras congeladas.

En el análisis estadístico con la prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ), la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) no mostró diferencia significativa en la mayoría de los experimentos respecto al alimento fresco. Sin embargo, en el experimento 11 (hojuela sin pretratamiento) las variables independientes afectaron significativamente la respuesta obtenida con respecto a la papa fresca. Además, se encontró una relación entre el parámetro **L** y  $\Delta E$ , ya que a menor valor del parámetro **L** mayor fue la  $\Delta E$ .

En la Figura 3.12 se muestra de manera física el color final de las distintas formas de papa congelada y descongelada.



**Figura 3.12** Muestras de papa descongelada después de la congelación.

Otro factor evaluado en la descongelación fue el cambio de volumen al final del proceso. Se observó que para la forma de cubos, la disminución de volumen en los alimentos descongelados respecto al volumen de las muestras de papa fresca, fue menor (8.303%) para aquellas que no tuvieron un pretratamiento con ácido cítrico previo al proceso de congelación en comparación a las que sí lo tuvieron (9.377%). Dicho comportamiento también fue observado para la forma de hojuela, siendo las muestras sin pretratamiento, las que obtuvieron menor disminución de volumen (7.455%) que las muestras con pretratamiento (9.363%). Sin embargo, para la forma de bastón se presentó un comportamiento distinto, la disminución del volumen en las muestras sin pretratamiento fue mínima, de 0.674%, y para las muestras con pretratamiento existió un incremento de volumen del 8.207%. En general el

pretratamiento interactuó para que las formas de papa tuvieran los mayores cambios de volumen respecto al alimento fresco.

La disminución de volumen o encogimiento puede ser atribuida a la pérdida de agua en el producto durante el proceso de descongelación (Bermúdez *et al.*, 2013; Ayala *et al.*, 2014). En el caso de la hojuela se observó que a mayor pérdida de X, mayor fue el decremento de volumen en la muestra, mientras que para la forma de cubo la mayor pérdida de X mostró una menor disminución de volumen. Para los bastones, la menor pérdida de agua presentó el encogimiento mínimo, y la mayor pérdida de humedad presentó el incremento de volumen. Estos cambios de volumen observados en los bastones, pueden atribuirse a que después de la descongelación, las células son incapaces de recuperar su forma y turgencia originales (Umaña, 2007) y posiblemente el proceso de congelación provocó grandes daños físicos en el tejido que impidieron el decremento de volumen pese a la pérdida de agua ocurrida.

### **3.5.2. Descongelación de la papa ultracongelada**

En la Tabla 3.11 se presentan los resultados obtenidos para las formas de la papa descongelada después de la ultracongelación.

Se observó que en general existió una disminución de X en los alimentos descongelados de 5%-19.5% con respecto a la X inicial. Sin embargo, el análisis de varianza con prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ) indicó que no hubo diferencia significativa entre la X de los experimentos y la X de la papa fresca, demostrando que los factores no tuvieron una influencia sobre la variable de respuesta obtenida al finalizar la descongelación. Además, se observó que las muestras sometidas a una congelación rápida presentaron una mayor sinéresis que las muestras sometidas a una congelación lenta, este efecto puede ser atribuido a la temperatura y el tiempo de congelación.

**Tabla 3.11** Características fisicoquímicas de papa descongelada después de la ultracongelación.

Condiciones congelación				Parámetros después de descongelación					
Exp	T <sub>uc</sub> (°C)	t <sub>a</sub>	Pret	X (%)	a <sub>w</sub>	Color			
						L	a	b	ΔE
				81.505	0.991	43.38	1.90	15.06	-
7	-60	C	S/AC	65.61 <sup>6.837</sup>	0.971 <sup>0.002</sup>	35.57 <sup>0.431</sup>	7.52 <sup>1.34</sup>	14.06 <sup>0.692</sup>	11.27 <sup>1.68</sup>
8	-60	C	C/AC	65.63 <sup>5.098</sup>	0.980 <sup>0.008</sup>	40.92 <sup>1.626</sup>	5.39 <sup>0.37</sup>	15.24 <sup>0.070</sup>	5.45 <sup>0.62</sup>
9	-60	B	S/AC	73.51 <sup>5.133</sup>	0.976 <sup>0.002</sup>	38.82 <sup>5.536</sup>	5.77 <sup>2.15</sup>	14.5 <sup>0.523</sup>	7.33 <sup>6.08</sup>
10	-60	B	C/AC	70.54 <sup>4.136</sup>	0.971 <sup>0.005</sup>	41.87 <sup>6.653</sup>	2.47 <sup>1.44</sup>	13.31 <sup>0.558</sup>	6.11 <sup>1.64</sup>
11	-60	H	S/AC	77.41 <sup>7.672</sup>	0.976 <sup>0.007</sup>	33.02 <sup>2.927</sup>	6.08 <sup>1.63</sup>	12.22 <sup>0.374</sup>	12.77 <sup>3.84</sup>
12	-60	H	C/AC	77.3 <sup>6.151</sup>	0.978 <sup>0.00</sup>	33.39 <sup>1.605</sup>	3.90 <sup>0.70</sup>	11.11 <sup>0.65</sup>	12.3 <sup>0.49</sup>

Resultados contradictorios sobre la pérdida de humedad se han reportado en investigaciones sobre congelación (lenta y rápida) y descongelación (a bajas y altas temperaturas) en alimentos con un importante contenido de almidón (Varavinit *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2005). En un estudio del proceso de congelación-descongelación de muestras de tres variedades de harinas de arroz, Varavinit *et al.* (2002) señalaron que la congelación rápida generó una menor sinéresis en el producto descongelado en comparación a la congelación lenta; así mismo, Álvarez *et al.* (2005) en puré de papa descongelado, indicaron que la previa congelación lenta provoca mayores pérdidas de fluido en las muestras descongeladas debido a la mayor ruptura en la estructura celular.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la a<sub>w</sub> (Tabla 3.11) el análisis estadístico (Dunnett α= 0.05), mostró diferencias significativas por parte de los experimentos 10 y 7 respecto al producto inicial, los demás experimentos no presentaron diferencia significativa. Las muestras de papa descongeladas presentaron a<sub>w</sub> cercanas a 1, esto es posiblemente atribuido a la gran cantidad de agua líquida contenida en la

---

superficie del alimento provocada por el derretimiento del hielo en espacios extracelulares (Delgado y Da-Wen, 2007; Leygonie *et al.*, 2012), aumentando con ello la inestabilidad del producto (Fennema, 1996; Badui, 2006).

El color de los alimentos está relacionado con los cambios químicos, bioquímicos, microbiológicos y físicos que ocurren durante el crecimiento, la maduración, el manejo y el procesamiento del mismo (Pathare *et al.*, 2012), razón por la que se estudió el color de la papa descongelada.

Se han realizado estudios de evaluación de los dos tipos de congelación (lenta y rápida) en conjunto con diversos métodos de descongelación a altas y bajas temperaturas (temperatura ambiente, baño de agua, horno de microondas y por alta presión) aplicados en diversos productos agrícolas, observando el efecto de dichos procesos sobre el color de los alimentos (Álvarez *et al.*, 2005; Holzwarth *et al.*, 2012; Wen *et al.*, 2015). Los resultados de este trabajo son congruentes con los resultados obtenidos en dichas investigaciones.

En el análisis de color de las muestras descongeladas de la papa ultracongelada, la luminosidad (L) tuvo una ligera disminución en su valor respecto al alimento fresco, sin embargo no presentó diferencias significativas (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ) entre las muestras de papa descongeladas y la papa fresca, indicando de esta manera que los factores empleados no afectaron directamente a las respuestas obtenidas.

Resultados similares fueron reportados por Holzwarth *et al.* (2012), los cuales investigaron el proceso de congelación y descongelación en fresas y encontraron una ligera disminución en los valores del parámetro L. La disminución del parámetro L representa el pardeamiento enzimático en las muestras (Wen *et al.*, 2015), el cual es acelerado y puede ser atribuido al daño de la compartimentación de las enzimas y el sustrato, resultando en una reacción enzimática aumentada (Jiang *et al.*, 2004).

El análisis estadístico (Dunnett  $\alpha= 0.05$ ) para el parámetro **a**, indicó que no existió diferencia significativa en los experimentos con respecto el producto inicial, con

excepción del experimento 7 (cubo de papa sin pretratamiento) que presentó diferencia significativa con respecto al alimento fresco.

En contraste a esta investigación, Holzwarth *et al.* (2012) observaron que no existió incremento del parámetro **a** para muestras descongeladas de fresa comparadas con las muestras congeladas rápidamente, posiblemente a un menor daño en el tejido resultando en una menor difusión de pigmentos en el alimento en comparación a las muestras congeladas lentamente.

Como se mencionó anteriormente, el incremento de **a** en las muestras de papa descongelada puede ser atribuido a los pigmentos marrones generados en el pardeamiento enzimático, observando de igual manera que las muestras sin pretratamiento presentaron mayor parámetro **a** que las muestras con pretratamiento, indicando que el ácido cítrico presentó efectos positivos como agente antioxidante.

Para el parámetro **b**, en los que la mayoría de los valores presentaron una disminución en comparación al alimento fresco, el análisis estadístico con prueba de Dunnett ( $\alpha= 0.05$ ) indicó diferencia significativa para los experimentos 10, 11 y 12 respecto a la papa fresca, siendo estos los valores más bajos de dicho parámetro de color. De manera similar, Holzwarth *et al.* (2012) para las muestras de fresas sometidas a congelación rápida y posteriormente descongeladas, reportaron un ligero decremento en los valores de **b** en relación a las muestras congeladas. Álvarez *et al.* (2005) reportaron para puré de papa cocido sometido a diferentes procesos de congelación a las temperaturas de -80, -40 y -24 °C, respectivamente, y a descongelación por horno de microondas y mediante un refrigerador doméstico a 4 °C, en los valores de los parámetros de color, los valores de **L** y **b** fueron menores a los controles frescos, como resultado los purés descongelados fueron más oscuros.

Para la  $\Delta E$  se realizó un análisis de varianza con prueba de Dunnett a  $\alpha= 0.05$  que indicó una diferencia significativa en los experimentos 11, 12 y 7 con referencia al producto inicial, de manera contraria a los experimentos 9, 10 y 8 que no presentaron diferencia significativa según el análisis estadístico. De igual manera que

---

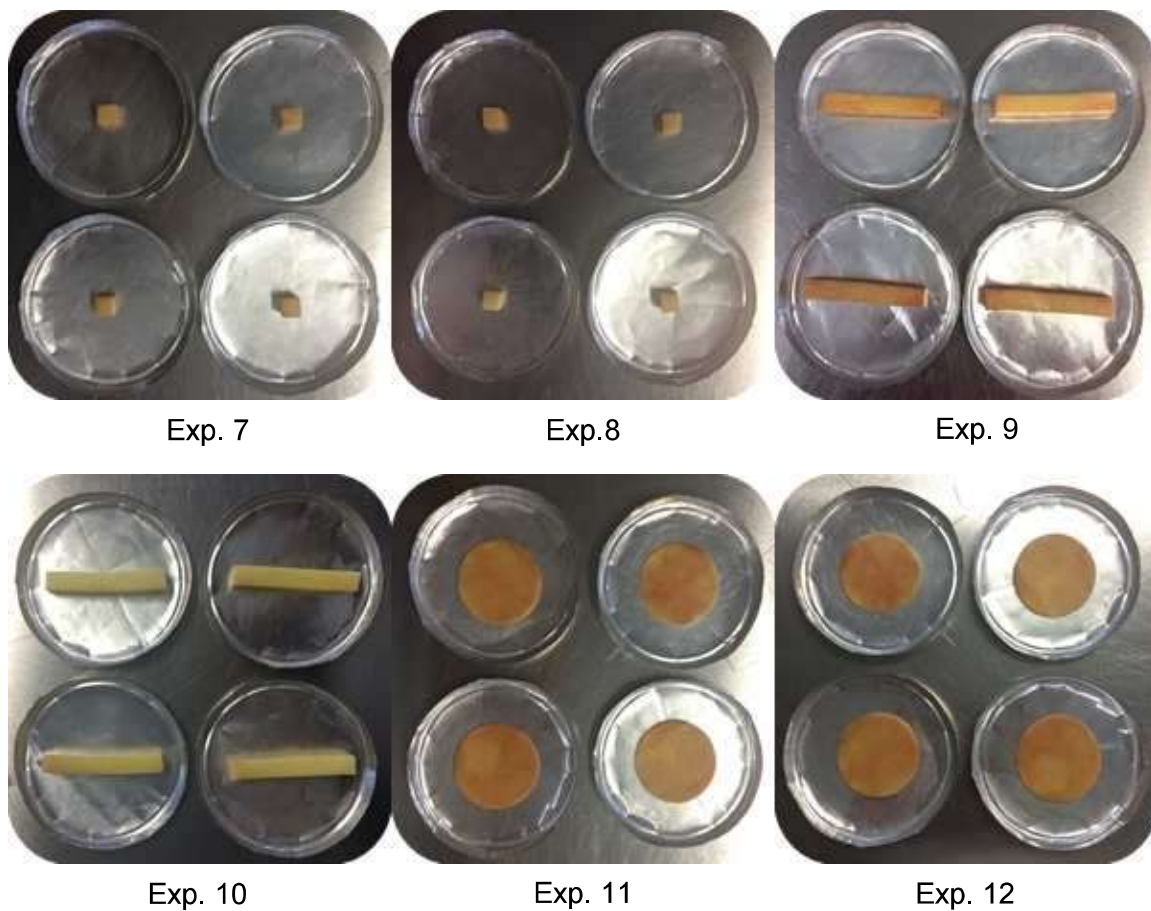
en las muestras que fueron congeladas a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se encontró que a la temperatura de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  existió una relación similar entre el parámetro **L** y  $\Delta\text{E}$ , siendo a menor valor del parámetro **L** mayor valor la  $\Delta\text{E}$ .

El tipo de descongelación empleada en este estudio en conjunto con la temperatura de ultracongelación seleccionada ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), provocó mayores diferencias significativas que con la temperatura de congelación también utilizada ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Se puede considerar que esto sea atribuido al método de descongelación, pues Wen *et al.* (2015), congelaron melón Hami a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y reportaron una  $\Delta\text{E}$  mayor en las muestras descongeladas de melón Hami por método de aire a  $19\text{-}20\text{ }^{\circ}\text{C}$  respecto a la fruta fresca, en comparación a las muestras sometidas a descongelación por microondas, ya que estas últimas presentaron las menores diferencias de color respecto a las muestras frescas. La descongelación mediante altas presiones presentó los valores mayores de  $\Delta\text{E}$  en la papa, pues causó severas pérdidas de color en el alimento.

En la Figura 3.13 se puede observar el color final de las diferentes formas de papa ultracongelada y descongelada, observando mejor los parámetros de color descritos anteriormente.

Durante la descongelación también se estudió el cambio de volumen en las muestras al final del proceso. Para la forma de cubos se observó una disminución de volumen menor para las muestras descongeladas que no tuvieron un pretratamiento con ácido cítrico antes de su ultracongelación (6.5%) que aquellas que sí lo tuvieron (11.64%), respecto a las muestras de papa fresca. La forma de bastón mostró un comportamiento contrario, pues las muestras descongeladas sin pretratamiento con ácido cítrico, presentaron un decremento de volumen mayor respecto a las muestras frescas, en comparación a aquellas muestras con pretratamiento, siendo los valores de 10.864 y 8.207%, respectivamente. La hojuela, sin embargo, presentó una disminución de volumen del 20.218% para aquellas muestras sin pretratamiento respecto a las muestras frescas, y para las muestras con pretratamiento hubo un incremento de volumen del 4.211%.





**Figura 3.13** Muestras de papa descongelada después de la ultracongelación.

La disminución de volumen puede ser principalmente atribuida a la pérdida de agua, la cual provoca estrés en la estructura celular del alimento causando cambios en la microestructura del mismo (Koç *et al.*, 2008). A pesar de que el encogimiento tenga una relación con la pérdida de X, se observó que para la forma de cubos y bastones, las muestras que presentaron mayor pérdida de agua (19.49 y 13.44%) tuvieron el menor decremento de volumen (6.5 y 8.207%). En el caso de las hojuelas, las muestras con mayor pérdida de X (5.159%) presentaron un incremento de volumen (4.21%), y las muestras que presentaron menor pérdida de X (5.018%) presentaron un decremento de volumen (20.018%). El incremento de volumen posiblemente sea producto del daño estructural causado por el proceso de ultracongelación, siendo

éste tal que durante la descongelación, las células no fueron capaces de recuperar su forma y turgencia al 100% (Umaña, 2007).

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó la caracterización fisicoquímica de la papa (*Solanum tuberosum*) variedad San José, proveniente del municipio de La Perla, Veracruz, obteniendo el contenido de humedad (81.505%),  $a_w$  (0.991), proteínas (2.232%), grasas (1.209%), cenizas (1.304%), carbohidratos (13.748%), calor específico (3.670 kJ/kg K) y conductividad térmica (0.541 W/m K).

Se establecieron las condiciones de operación de temperatura de congelación (-5, -10 y -15 °C) y ultracongelación (-40, -60 y -80 °C) para obtener papa congelada en diversas formas con características aceptables.

En términos generales, se observó que el proceso de congelación y ultracongelación tuvieron gran influencia sobre las variables respuesta ( $X_{con}$ ,  $V_{in}$  y color).

La papa presentó una estabilización del  $X_{con}$  a partir de los 120 minutos en el proceso de congelación, obteniendo al final de éste valores desde 45.047% hasta 73.957%. En la ultracongelación, el tubérculo mostró una estabilización de dicha variable en menor tiempo, a los 60 minutos, y al final de los 180 minutos de lograron obtener valores de  $X_{con}$  desde 57.20% hasta 77.87%. Estos resultados indican que la posibilidad de deterioro de la papa por microorganismos u otros agentes fue disminuida.

Bajo las condiciones de este trabajo y de manera general se observó que la papa (*Solanum tuberosum*) variedad San José, con una  $X$  de 81.505% alcanzó en sus tres formas estudiadas un  $V_{in}$  final de 7 % en ambos procesos de congelación, sin embargo cada experimento presentó diferente comportamiento a través del proceso. Existiendo una relación del incremento de volumen y del agua congelable de la papa durante ambas congelaciones.

El proceso de congelación y ultracongelación incrementaron la conductividad térmica de la papa, obteniendo al final de éstos valores desde 1.285 hasta 2.209 W/m K;

mientras que para el calor específico aparente de la papa se encontró que después del punto de congelación la disminución de temperatura causó un decremento en los valores del  $C_p$  desde 15.582 kJ/kg K (a  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ ) hasta 0.534 kJ/ kg K (a  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Las condiciones de congelación y ultracongelación no tuvieron efecto significativo en el parámetro de color **a** de la papa congelada/ultracongelada respecto a la papa fresca, sin embargo, sí tuvieron efecto significativo en el parámetro **b** y el parámetro **L**, siendo este último el que mayor influencia tuvo sobre la  $\Delta E$ .

En general, durante el proceso de descongelación a la temperatura de  $27 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ , las muestras de papa congeladas y ultracongeladas tuvieron una pérdida de X desde un 4.8% 19.5%, una ligera disminución de  $a_w$  (valores de 0.967-0.985) respecto al producto fresco y un pardeamiento enzimático reflejado mayormente en el cambio del parámetro de color **L** y **a**. La mayoría de las muestras descongeladas presentaron una disminución de volumen respecto a las formas de papa fresca.

Para futuras investigaciones se recomienda realizar determinaciones de propiedades nutrimentales de la papa descongelada, con el fin de evaluar la posible pérdida de nutrientes por el fenómeno de sinéresis, así como por los efectos de las bajas temperaturas alcanzadas en los procesos de congelación.

También se recomienda estudiar el efecto del almacenamiento de la papa congelada sobre sus propiedades fisicoquímicas, con el fin de observar cómo influye la temperatura y sus variaciones sobre el fenómeno de la recristalización, siendo de interés el daño celular causado al alimento.

Finalmente, se recomienda llevar a cabo la optimización de ambos procesos de congelación para encontrar las condiciones óptimas con las cuales se pueda obtener un producto congelado de alta calidad para que, al ser descongelado, conserve en gran medida las características fisicoquímicas del alimento fresco, a un menor costo de producción.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A & E. 2009. Ciencia del color. <http://www.amefird.com/es/color-2/ciencia-del-color/>. (Consultada octubre, 2015).
- Aguilar, M.J. 2012. Métodos de conservación de alimentos. Red Tercer Milenio. México.
- Alvarez, M.D. y Canet, W. 1997. Effect of pre-cooling and freezing rate on mechanical strength of potato tissues (cv Monalisa) at freezing temperatures. *Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und –Forschung*, **205**(1):282-289.
- Álvarez, M.D., Fernández, C. y Canet, W. 2005. Effect of freezing/thawing conditions and long-term frozen storage on the quality of mashed potatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **85**(2005):2327-2340.
- Alvarez, M.D., Morillo, M. J. y Canet, W. 1999. Optimisation of freezing process with pressure steaming of potato tissues (cv Monalisa). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **79**(1):1237-1248.
- ASHRAE. 2006. Thermal properties of foods in American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Handbook. EUA.
- Ayala, A.A., Sánchez, M. y Rodríguez, H. 2014. Influencia de la osmocongelación sobre algunas propiedades físicas de papaya (*Carica papaya* L.). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, **17**(2):487-494.
- Badui, D.S. 2006. Química de los alimentos. Editorial Pearson Educación. México.
- Barreiro, M.J.A & Sandoval, B.A.J. 2006. Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Editorial Equinoccio. Venezuela.

- Bartolome, A. P., Ruperez, P. y Fuster, C. 1996. Freezing rate and frozen storage effects on color and sensory characteristics of pineapple fruit slices. *Journal of Food Science*, **61**(1):154-156.
- BDMTM. 2009. Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana. <http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/monografia.php?l=3&t=&id=7742>. (Consultada septiembre, 2015).
- Bermúdez, A., Narváez, M., Cadena, M. I. y Ayala-Aponte, A. 2013. Reducción de pérdida de calidad de melón (*Cucumis Melo*) durante la congelación mediante aplicación previa de deshidratación osmótica. *Revista Alimentos Hoy*, **22**(30)23-29.
- Bianeth, C. y Restrepo, L. P. 2013. Compuestos fenólicos y carotenoides en la papa: revisión. *Actualización en Nutrición*, **14**(1):25-32.
- Boonsumrej, S., Chaiwanichsiri, S., Tantratian, S., Suzuki, T. y Takai, R. 2007. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing. *Journal of Food Engineering* **80**(2007)292-299.
- Cano, M. P. y Marín, M. A. 1992. Pigment composition and color of frozen and canned kiwi fruit slices. *J. Agric. Food Chem.*, **40**(1):2141-2146.
- Carbonell, S., Oliveira, J.C. y Kelly, A. L. 2006. Effect of pretreatments and freezing rate on the firmness of potato tissue after a freeze-thaw cycle. *International Journal of Food Science and Technology*, **41**(1):757-767.
- CIP. 2014. Centro Internacional de la Papa. <http://cipotato.org/potato-2/>. (Consultada agosto, 2015).



- CONPAPA. 2015. Confederación Nacional de Productores de Papa de la República Mexicana. [http://www.conpapa.org.mx/files/press-releases/2015/BoletinCONPAPA\\_001\\_2015.pdf](http://www.conpapa.org.mx/files/press-releases/2015/BoletinCONPAPA_001_2015.pdf). (Consultada agosto, 2015).
- Cuibus, L., Castro-Giráldez, M., Fito, P.J. y Fabbri, A. 2013. Application of infrared thermography and dielectric spectroscopy for controlling freezing process of raw potato. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **24**(2014):80-87.
- Da-Wen, S. 2012. Handbook of frozen food processing and packaging. CRC Press. EUA.
- Delgado, A.E. y Da-Wen, S. 2007. Influence of Surface water activity on freezing/thawing times and weight loss prediction. *Journal of Food Engineering*, **83**(2007)23-30.
- Della Rocca, P. y Mascheroni, R. 2011. Deshidratación de papas por métodos combinados de secado: deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente. *Proyecciones*, **9**(2):11-26.
- Della Rocca, P.A., Roche, L.A. y Mascheroni, R.H. 2013. Estudio comparativo de la congelación de papa (*Solanum tuberosum L.*) sometida a diferentes pretratamientos. *Proyecciones*, **11**(1):31-46.
- Delmoro, J., Muñoz, D., Nadal, V., Clementz, A. y Pranzetti, V. 2010. El color en los alimentos: determinación de color en mieles. *Invenio*, **13**(25):145-152.
- Domínguez-Niño, A., Buendía-González, A. N., Cantú-Lozano, D., Andrade-González, I. y Luna-Solano, G. 2016. Effect of fluidized bed drying on physicochemical and microbiological properties of mexican fresh cheese. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, manuscrito aceptado.

- FAO. 2008. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/genero.html>. (Consultada agosto, 2015).
- FAOSTAT. 2013. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistic Divisions. <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S>. (Consultada agosto, 2015).
- Fennema, O.R. 1996. Food chemistry. Editorial Marcel Dekker, Inc. EUA.
- Finglas, P.M., Roe, M.A., Pinchen, H.M., Berry, R., Church, S.M., Dodhia, S.K., Farron-Wilson, M. y Swan, G. 2015. McCance and Widdowson's The Composition of Foods. Royal Society of Chemistry. Reino Unido.
- Fricke, B. A. y Becker, B.R. 2001. Evaluation of thermophysical property models for foods. *HVCA&R Research*, **7**(4):311-330.
- Hamdami, N., Monteau, J.Y. y Bail, A.L. 2004. Transport properties of high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. Part 1: Thermophysical properties and water activity. *Journal of Food Engineering*, **62**(2004):373-383.
- Holzwarth, M., Korhummel, S., Carle, R. y Kammerer, D.R. 2012. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch). *Food Research International*, **48**(2012):241-248.
- Hunterlab. 2012. Measuring color using Hunter L, a, b versus CIE 1976 L\*a\*b\*. <http://www.hunterlab.com/an-1005b.pdf>. (Consultada octubre, 2015).
- James, C., Purnell, G. y James, S. 2014. A critical review of dehydrofreezing of fruits and vegetables. *Food Bioprocess Technology*, **7**(2014):1219-1234.
- Jiang, Y., Li, Y. Li, J. 2004. Browning control, shelf life extension and quality maintenance of frozen litchi fruit by hydrochloric acid. *Journal of Food Engineering*, **63**(2004):147-151.

- Jokic, S., Mujic, I., Martinov, M., Velic, D., Bilic, M. y Lukinac, J. 2009. Influence of drying procedure on colour and rehydratin characteristic of wild asparagus. *Czech J. Food Sci.*, **27**(3):171-177.
- Koç, B., Eren, I. y Ertekin, F. K. 2008. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, **85**(2008)340-349.
- Laboratorio de color y calidad de los alimentos. 2014. Análisis de color. <http://www.color.us.es/esp/investigacion/analisis-del-color.htm>. (Consultada octubre, 2015).
- Lamikanra, O. 2002. Fresh-cut Fruits and Vegetables: Science, Technology, and Market. CRC Press LCC. EUA.
- Lee, M.H., Baek, M.H., Cha, D.S., Park, H.J. y Lim, S.T. 2002. Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. *Journal Hydrocolloids*, **12**(2002):345-352
- Lewicki, P.P y Pawlak, G. 2005. Effect of mode of drying on microstructure of potato. *Drying Technology*, **23**(1):847-869.
- Leygonie, C., Britz, T. J. y Hoffman, L. C. 2012. Impact of freezing and thawing on the quality of meat:Review. *Meat Science*, **91**(2012)93-98.
- Lide, D. R. 1993. Handbook of chemistry and physics. CRC Press LCC. EUA.
- Lozano-Acevedo, A., Jiménez-Fernández, M., Ragazzo-Sánchez, A., Urrea-García, G.R. y Luna-Solano, G. 2011. Fluidized bed drying process of thinly slices potato (*Solanum tuberosum*). *American Journal of Potato Research*, **88**(1):360-366.
- Mason, B. J. 1957. The physics of clouds. Oxford University Press. Inglaterra.

- McKellar, A., Paterson, J. y Pham, Q.T. 2009. A comparison of two models for stresses and strains during food freezing. *Journal of food engineering*, **95**(2009):142-150.
- Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M. y Heredia, F. J. 2004. Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, **54**(2):209-215.
- Miranda, M., Maureira, H., Rodríguez, K. y Vega-Gálvez, A. 2009. Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of *Aloe Vera* (*Aleo Barbadosensis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering*, **91**(2009):297-304.
- Montaldo, A. 1984. Cultivo y mejoramiento de la papa. Editorial Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Costa Rica.
- Montgomery, D.C. 2012. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, Inc. EUA.
- Morales, S. D. F. 2011. Crecimiento, contenido de azúcares y capacidad de brotación en semilla tubérculo de papa (*Solanum tuberosum* L.). Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- 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.
- Navarro, F. 2000. Etimologías, Patata (I) [http://cvc.cervantes.es/el\\_rinconete/anteriores/enero\\_00/21012000\\_01.htm](http://cvc.cervantes.es/el_rinconete/anteriores/enero_00/21012000_01.htm) (Consultado agosto, 2015).
- Núñez-Galindo, Y. 2016. Proceso de secado por aspersion del pulque proveniente de *Agave salmiana*. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

- Ochoa, C.M. 1999. Las papas de Sudamerica: Perú (Parte I). Editorial Centro Internacional de la Papa (CIP). Perú.
- Onamu, R., Legaria-Solano, P., Sahagún-Castellanos, J., Rodríguez-de-la-O, J. y Pérez-Nieto, J. 2015. Diversidad genética entre variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) cultivadas en México. *Rev. Fitotec. Mex.*, **38**(1):7-15.
- Orrego, A. C. E. 2003. Procesamiento de alimentos. Editorial Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Colombia.
- Orrego. A. C. E. 2008. Congelación y liofilización de alimentos. Editorial Artes gráficas Tizan Ltda. Manizales. Colombia.
- Otero, L., Martino, M., Zaritzky, N., Solas, M. y Sanz, P. D. 2000. Preservation of microstructure in peach and mango during high-pressure-shift freezing. *Journal of Food Science*, **65**(3)466-470
- Pathare, P.B., Opara, U.L. y Al-Said, F.A. 2013. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food Bioprocess Technol.*, **6**(2013):36-60.
- Pham, Q.T. 2016. Freezing theory in Encyclopedia of food and health. Elsevier. Inglaterra.
- Pumisacho, M. y Sherwood, S. 2002. El cultivo de la papa en Ecuador. Editorial INIAP. Ecuador.
- Ramirez-Navas, J.S., Cañizares, J.E. y Acevedo, D. 2011. Criodesecación atmosférica de papa (*Solanum tuberosum*). *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Antioquia*, **61**(1):74-82.
- Reyes, A., Vega, R., Bustos, R. y Araneda, C. 2008. Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. *Drying Technology*, **26**(10):1272-1285.

- Serpil, S. y Servet, G. S. 2006. Physical properties of foods. Springer New York. EUA.
- SIAP. 2015. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>. (Consultada agosto, 2015).
- Singh, J. y Kaur, L. 2009. Advances in Potato Chemistry and Technology. Editorial Elsevier. USA.
- Singh, R. P. y Heldman, D. R. 2009. Introduction to Food Engineering. Editorial Elsevier. EUA.
- SIOVM. 1999. Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/20914\\_sg7.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/20914_sg7.pdf). (Consultada septiembre, 2015).
- SPV. 2015. Sistemática de Plantas Vasculares. [http://www.thecompositaehut.com/www\\_tch/webcurso\\_spv/familias\\_pv/solanaceae.html](http://www.thecompositaehut.com/www_tch/webcurso_spv/familias_pv/solanaceae.html). (Consultada agosto, 2015).
- Tavman, I. H., Tavman, S. y Kumcuoglu, S. 2003. Thermophysical properties of foods at frozen state. Low temperature and cryogenic refrigeration. Springer Netherlands. Países bajos.
- Umaña, C.E. 2007. Conservación de alimentos por frío, refrigeración/congelación. Editorial FIAGRO Y FUSADES PROINNOVA. El Salvador.
- Varavinit, S., Shobsngob, S., Varanyanond, W., Chinachoti, P. y Naivikul, O. 2002. Freezing and thawing conditions affect the gel stability on different varieties of rice flour. *Starch/Stärke*, **54**(2002):31-36.
- Wen, X., Hu, R., Zhao, J., Peng, Y. y Ni, Y. 2015. Evaluation of the effects of different thawing methods on texture, color and ascorbic acid retention of frozen

hami melón (*Cucumis melo var.saccharinus*). *International Journal of Food Science and Technology*, **50**(5):1116-1122.

Zaritzky, N.E. 2010. Chemical and physical deterioration of frozen foods in Chemical deterioration and physical instability of food and beverages. Woodhead Publishing limited. Reino Unido.