



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

Efecto crioprotector de nanoliposomas de aceite esencial de naranja sobre los cambios de calidad de gajos de mandarina congelada.

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:
Yennitze Zurisaday Guillén Rojas

ASESORES:
DRA. MARIA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA
I.A. ALFREDO ALVAREZ CÁRDENAS

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

U.N.A.M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis y examen profesional.**

Efecto crioprotector de nanoliposomas de aceite esencial de naranja sobre los cambios de calidad de gajos de mandarina congelada.

Que presenta la pasante: **Yennitze Zurisaday Guillén Rojas.**

Con número de cuenta: **414097887** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos.**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de octubre de 2021.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en C. Tais Nopal Guerrero	
VOCAL	Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza	
SECRETARIO	Dra. María Guadalupe López Palacios	
1er. SUPLENTE	I.A. Maritza Rocandio Pineda	
2do. SUPLENTE	Dr. Martín Ramón Porras Godínez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

AGRADECIMIENTO

Al proyecto **PAPIIT IN 222520** “Manufactura, evaluación, caracterización y uso de sistemas nanoestructurados en el incremento de vida útil de alimentos” DGAPA-UNAM.

Al Programa interno de cátedras de Investigación. “Extracción, caracterización y manufactura de sistemas nanoestructurados naturales como coadyuvantes en el proceso con tecnologías emergentes para la conservación de alimentos”.

Yennitze Zurisaday Guillén Rojas, agradece el apoyo técnico para la realización de pruebas texturales y envasado a la Dra. María de los Ángeles Cornejo Villegas del Laboratorio 16: Procesos de Transformación y Tecnologías Emergentes en Alimentos-UIM FES-Cuautitlán.

Lugar de realización de la tesis:

Laboratorio de Procesos de Transformación y Tecnologías Emergentes en Alimentos de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán – UNAM.

“Lo que conocemos es una gota, lo que no conocemos es un océano.”

-Isaac Newton

DEDICATORIAS

Gracias al Universo, a Dios, a Ganesha, a Buda, a los Ángeles, a Allah, a Indra, gracias a todo y sobre todo a mí, por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, por permitirme concluir y cerrar este ciclo para poder llamarme Ingeniero.

A mis padres, Moisés e Imelda, no tengo palabras para expresar el cariño y lo agradecida que estoy con ustedes, gracias por brindarme el apoyo incondicional en todos los sentidos para poder concluir esta etapa en mi vida. Gracias por todas las enseñanzas y motivaciones que me han brindado para poder concretar todo lo que he logrado a lo largo de mi vida, gracias mamá por los consejos, cariño y atención del día al día, gracias papá por enseñarme que una calificación no te define en la vida, gracias por el apoyo emocional. Gracias a ambos por todo lo que me han brindado, este logro también es suyo, es un orgullo y privilegio el ser su hija, los amo.

A mis hermanas, Amairani y Yamilka, estoy tan agradecida de tenerlas en mi vida y de poder compartir cada etapa de mi vida con ustedes. Gracias por todo el apoyo incondicional que me brindan siempre para cada decisión y por las experiencias que puedo compartir siempre con las dos, espero poder ser una inspiración para las dos, así como ustedes me han inspirado a lo largo de estos años. Eli, te agradezco por las pláticas, consejos y todo lo que compartimos, eres tan sabia y agradezco que me sensibilices para ciertos temas. Yos, estoy tan agradecida el poder haber compartido contigo una parte importante que es el de practicar un deporte que tanto amo y que tanto extraño jugarlo contigo, gracias por los dos chukys que tanto adoro.

A Xarenni, gracias por siempre acompañarme en las desveladas y estar siempre que me sentía decaída, gracias por seguir en mi vida y por ser mi compañera fiel en todo momento, por motivarme y alegrarme cada día con tu esencia.

A Arturo, realmente no sé cómo expresar el amor y agradecimiento que siento hacia ti, gracias por estos años que me has acompañado, desde quinto semestre que me has apoyado, alentado y a veces en ciertas ocasiones hasta obligado (para concluir el proceso de titulación), gracias por la paciencia que tienes conmigo y de siempre buscar la manera de ayudarme, gracias por siempre estar en los momentos difíciles de la vida tanto académica como cotidiana. Agradezco todo lo que hemos vivido y eres lo mejor que la UNAM me pudo dar, loviu.

A mis amigas, Karla, Darinka, Fanny, Cristina, estoy agradecida de haber compartido esta etapa de mi vida con ustedes, es de las mejores amistades que la UNAM me ha dejado. También quiero agradecer a Gabriel por ser mi amigo desde el primer semestre y acompañarme en el transporte hasta donde los semestres nos lo permitieron. Quiero agradecer a Ángel (Patrick) y a Gustavo por igual ser mis amigos a lo largo de la carrera y por todo lo que compartimos durante las clases, fue bueno tomar clases con uds., se hicieron más amenas y divertidas con los chismes que se aventaban, ni FB sabe tanto de chismes como uds., gracias por los pequeños momentos compartidos amigos. Y también quiero agradecer a todos los que estuvieron estos años de universidad.

A Jacqueline, Aranza y Diana, agradezco haberlas conocido en el tocho y en lem, sin uds. los lem's no sé cómo hubiera sido, gracias por reírnos de nuestras desgracias durante las entrevistas, a Aranza y sin hacer menos a las demás, por poder compartir contigo mi última quema contigo, fue toda una experiencia el compartir contigo el emparrillado mujer.

A la Dra. Luz Zambrano por ser una mujer inspiradora, por compartir sus conocimientos y experiencias, gracias por inspirarme académicamente, por abrirme las puertas de su laboratorio y un apoyo para que este proyecto de investigación concluyera.

A mis sinodales, la Dra. Luz Zambrano, el profesor Alfredo Álvarez, la maestra Tais Nopal, la Dra. Guadalupe Palacios, la profesora Maritza Rocandio y el Dr. Martín Porras, por su gran apoyo en la culminación de este trabajo, gracias por su paciencia y correcciones para mejora este trabajo haciendo posible el cierre de este proyecto.

A la UNAM, por ser lo mejor que me ha pasado en mi vida académica y personal, por todas las experiencias que me ha brindado y por todas las personas que pude conocer a lo largo de mi vida universitaria, gracias por brindarme una carrera universitaria y una formación profesional.

“Por mi raza hablará el espíritu”

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
RESUMEN	I
INTRODUCCIÓN	III
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	
1.1 Cítricos	1
1.2. Mandarina, morfología y anatomía	2
1.2.1. Morfología y anatomía	2
1.2.2. Variedades	4
1.3. Enzimas	6
1.4. Proceso de congelación de alimentos	8
1.4.1. Curva de congelación	9
1.4.2. Nucleación y Crecimiento de cristal de hielo	11
1.4.3. Importancia de la velocidad de congelación	12
1.4.4. Métodos de congelación	13
1.4.4.1. Sistemas de contacto directo	14
1.4.4.2. Sistemas de contacto indirecto	17
1.5. Almacenamiento congelado de mandarina	21
1.6. Descongelación	22
1.7. Crioprotectores	22
1.7.1. Polisacáridos como crioprotectores en alimentos	23
1.7.2. Almidones modificados de maíz ceroso	24
1.7.3. Fructanos de Agave	25
1.8. Nanotecnología	26
1.8.1. Nanopartículas	27
1.8.2. Nanoliposomas	28
1.8.3. Aceite esencial de naranja para la encapsulación	29
CAPITULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	
2.1. Problema	31
2.2. Hipótesis de Investigación	32
2.3. Definición de objetivos	32
2.3.1. Objetivo General	32
2.3.2. Objetivos Particulares	32
2.4. Selección y justificación de variables	33
2.5. Diseño experimental	34
2.6. Actividades Preliminares	35
2.6.1. Selección y acondicionamiento de materia prima	35
2.6.2. Caracterización y acondicionamiento de congelador	35
2.6.3. Elaboración de nanoliposomas	38
2.6.4. Evaluación de tamaño de partícula e índice de polidispersión de nanoliposomas	38
2.6.5. Determinación de aceite esencial de naranja infiltrado	38
2.6.6. Selección de material de envase	39

2.7. Actividades Experimentales	40
2.7.1. Diagrama de Proceso	40
2.7.2. Determinación de curvas de congelación	42
2.7.3. Determinación de tiempo y velocidad de congelación	43
2.7.4. Determinación de color	43
2.7.5. Determinación de firmeza	44
2.7.6. Determinación de microscopia digital (tamaño de cristal)	45
2.7.7. Determinación de pérdida de peso	46
2.7.8. Determinación de porcentaje de exudación	46
CAPITULO III: TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
3.1 Resultados de actividades preliminares	47
3.1.1 Acondicionamiento de congelador	47
3.1.2 Tamaño de partícula e índice de polidispersión de nanoliposomas	51
3.2 Curvas de congelación	52
3.3 Análisis de tamaño de cristal por microscopia digital	53
3.4 Pérdida de peso	59
3.5 Porcentaje de exudación	62
3.6 Evaluación de color	66
3.6.1 Luminosidad	67
3.6.2 Cromaticidad	69
3.6.3 Ángulo Hue	72
3.7 Textura	75
3.7.1 Dureza con 1 ciclo de compresión	76
3.7.2 Deformación Según Dureza	79
CONCLUSIONES	83
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	85
ANEXOS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Nombre de la figura	Página
Figura 1	Sección transversal de cítricos.	3
Figura 2	Sección longitudinal que muestra paquetes vasculares y frutales.	3
Figura 3	Representación esquemática de la capa epidérmica, cutina y cera en la corteza de la cáscara.	4
Figura 4	Estructura básica de Vitamina A	7
Figura 5	Estructura básica de Vitamina C	7
Figura 6	Estructura básica de Vitamina E	8
	Cinética de congelación:	
Figura 7	a) Cinética de congelación de agua pura	10
	b) Cinética de congelación de solución acuosa	
Figura 8	Diagrama esquemático de la congelación por contacto directo.	14
Figura 9	Esquema del sistema de congelación de placas.	15
Figura 10	Esquemización de un sistema de congelación por inmersión.	16
Figura 11	Sistemas de congelación por lecho fluidizado.	18
Figura 12	Esquemización de la congelación por aire forzado.	18
Figura 13	Congelador de lecho fluidizado.	19
Figura 14	Congelador de bandas transportadoras.	20
Figura 15	Congelador de bandas transportadoras en espiral o de curva.	21
Figura 16	Nano capsulas y nano esferas.	28
Figura 17	Mandarina recién pelada y lista para obtener los gajos.	35
Figura 18	Congelador estático empleado en la experimentación.	36
Figura 19	Dimensiones del congelador estático.	36
Figura 20	Temperaturas por zonas en la cámara de congelación.	37
Figura 21	Acondicionamiento del sistema aislante para la mayor velocidad de congelación.	38
	Determinación de aceite esencial de naranja infiltrado:	
Figura 22	a) Centrifuga <i>HERNLE Z 323 K</i>	39
	b) Espectrofotómetro <i>Genesys 10 UV-VIS</i>	
Figura 23	Envase de polietileno de alta densidad	39
Figura 24	Etapas de proceso seguidas en la congelación de gajos de mandarina.	40
Figura 25	Infiltración de nanoliposomas por inmersión.	41
Figura 26	Monitoreo de temperatura en el centro del gajo de mandarina.	41
Figura 27	Gajos de mandarina envasada y listas para monitoreo de almacenamiento.	42
Figura 28	Colorímetro Konica Minolta CM-600d.	44
Figura 29	Texturómetro Brookfield.	45
Figura 30	Microscopio digital Celestron 44302.	45

Figura 31	Distribución de temperatura en la cámara de congelación.	48
Figura 32	Historias térmicas de caracterización de congelador por convección natural y aire forzado.	48
Figura 33	Curvas de congelación con diferentes tratamientos (agente crioprotector y tipo de infiltración) en gajos de mandarina por congelación por convección natural.	52
Figura 34	Curvas de congelación con diferentes tratamientos (agente crioprotector y tipo de infiltración) en gajos de mandarina, por congelación por aire forzado.	53
Figura 35	Tamaño de cristal de hielo por el método de congelación por convección natural, empleando diferentes tratamientos de agente crioprotector.	57
Figura 36	Tamaño de cristal de hielo por el método de congelación por aire forzado, empleando diferentes tratamientos de agente crioprotector.	58
Figura 37	Porcentaje de Pérdida de peso en gajos de mandarina congelados por convección natural.	60
Figura 38	Porcentaje de Pérdida de peso para gajos de mandarina congelados por aire forzado.	61
Figura 39	Porcentaje de exudación en función al tratamiento crioprotector empleado, congelado por convección natural.	63
Figura 40	Porcentaje de exudación en función al tratamiento crioprotector empleado, congelado por aire forzado.	65
Figura 41	Cambios de Luminosidad en función al tratamiento para muestras congeladas por convección natural.	67
Figura 42	Cambios de Luminosidad en función de los tratamientos para mandarina congelada por aire forzado.	68
Figura 43	Cambios de cromaticidad en función al tiempo y tratamientos para gajos de mandarina congelados por convección natural.	70
Figura 44	Cambios de cromaticidad en función al tiempo y tratamientos para gajos de mandarina congelados por aire forzado.	71
Figura 45	Cambios en el ángulo de tono en función al tiempo de almacenamiento y tratamiento para gajos de mandarina congelada por convección natural.	73
Figura 46	Cambios en el ángulo de tono en función al tiempo de almacenamiento y tratamiento, para mandarina congelada por aire forzado.	74
Figura 47	Esfera de cromaticidad	75
Figura 48	Dureza en el primer ciclo de compresión en función a los tratamientos, congelados por convección natural.	77
Figura 49	Dureza en el primer ciclo de compresión en función a los tratamientos, congelado por aire forzado.	78

Figura 50	Elasticidad en función de los tratamientos aplicados congelado por convección natural.	80
Figura 51	Elasticidad en función de los tratamientos aplicados, congelado por aire forzado.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Número	Nombre de la tabla	Página
Tabla 1	Factores y Niveles de variación de la experimentación.	33
Tabla 2	Diseño Factorial 3k, empleado para analizar el efecto de las variables sobre las características de gajos de mandarina congelados.	34
Tabla 3	Especificaciones técnicas de la cámara de congelación y almacenamiento.	36
Tabla 4	Distribución de temperaturas en las diferentes zonas de la cámara de congelación.	47
Tabla 5	Condiciones y constantes de congelación de gajos de mandarina.	50
Tabla 6	Tamaño de Partícula e índice de polidispersidad de nanoliposomas con aceite esencial de naranja.	51
Tabla 7	Micrografías de gajos de mandarina durante el almacenamiento en función a la velocidad de congelación empleando convección natural.	55
Tabla 8	Micrografías de gajos de mandarina durante el almacenamiento en función de la velocidad de congelación empleando aire forzado.	56

RESUMEN

La mandarina es un fruto no climatérico aromático y de buen sabor; este ha incrementado su demanda a nivel internacional. Sin embargo, debido a sus características, tiene una vida útil corta por lo que se buscan alternativas de conservación. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto crioprotector de nanoliposomas funcionalizados con aceite esencial de naranja soportados en oligo y polisacáridos sobre la estabilidad de gajos de mandarina congelada y almacenada a -20 °C durante 28 días. Evaluando los cambios en los parámetros de calidad: textura, color, pH, daño estructural, después de la congelación y estabilización de 2 y 2.5 h, y posterior almacenamiento monitoreando los cambios 1 vez por semana durante 4 semanas. De acuerdo con los resultados obtenidos el mejor tratamiento aplicado fue utilizando nanoliposomas con aceite esencial de naranja en conjunto con el almidón N Creamer® infiltrado por inyección, en una congelación por aire forzado, obteniendo mejoras en algunos parámetros de calidad como: elasticidad y firmeza del gajo una vez que se descongeló. La utilización del tratamiento nanoliposomas en conjunto con el polímero N creamer® y Fructanos de Agave, infiltrados por inmersión y congelación por aire forzado se mostraron mejores resultados en cuanto a los parámetros de color, teniendo menos variaciones de luminosidad, cromaticidad y ángulo de tono. El empleo de nanoliposomas y un polímero, utilizado en cada tratamiento contribuyó a tener una mejor elasticidad, firmeza y color. Los nanoliposomas ayudaron a disminuir el tamaño de cristal siendo de un tamaño más homogéneos en comparación con las muestras control, manteniendo por más tiempo las características fisicoquímicas de los gajos de mandarina, haciendo que el producto sea visiblemente más atractivo para el consumidor.

INTRODUCCIÓN

La mandarina (*Citrus tangerina*), es una fruta tropical de temporada y no climatérica (Anderson *et al.*, 2012). La mandarina es una fruta cítrica, aceptada por los consumidores en todo el mundo, por sus colores atractivos, agradable sabor y aroma. Su color varía desde el anaranjado claro al más intenso y brillante. Su pulpa, de color amarillo y perfumada, es de sabor dulce y agradable (Hevia, 2007); la mandarina se ha convertido en una importante fuente de nutrientes ya que contiene vitaminas hidrosolubles y liposolubles (Zou *et al.*, 2016). También, la mandarina contiene sustancias con función biológica con potencial antiinflamatorio, anticancerígeno y antienvjecimiento, atribuyéndose propiedades de prevención de enfermedades crónico-degenerativas como diabetes y enfermedades cardiovasculares asociadas a la capacidad antioxidante de sus compuestos bioactivos (Zou *et al.*, 2016).

Las frutas cítricas como la mandarina son ricas en fuentes fitoquímicos como; vitaminas A, C y E, elementos minerales, flavonoides, carotenoides, pectinas y otros compuestos. Los flavonoides del jugo cítrico, particularmente de las naranjas y mandarinas, son efectivos en mejorar la circulación sanguínea y posee antialérgicos y propiedades antivirales. El aroma característico de la mandarina se puede atribuir a los aceites solubles en agua y de su alto punto de ebullición. Al aumentar la madurez y la temperatura de almacenamiento los componentes volátiles del fruto son liberados, incrementándose también el aroma.

En los últimos años se ha incrementado el consumo de alimentos semiprocesado y procesados (enlatados, deshidratados, condensados, cortados, congelados, precocidos entre otros), por la conveniencia de su consumo o por la reducción del tiempo de preparación (Bajpai *et al.*, 2018). Actualmente el consumidor prefiere alimentos naturales, sin conservadores y producidos de manera menos ofensiva para el medio ambiente (Evans, 2013).

El tratamiento de los productos mediante congelación constituye un medio eficaz para mantener casi inalterables sus características durante un largo tiempo gracias a una serie de procesos, entre los que destacan el descenso de la temperatura del producto, la disminución de la velocidad de las reacciones enzimáticas y la inhibición de la actividad microbiológica. El objetivo de la congelación es hacer este proceso reversible, sin embargo, la modificación de las fases del agua con el característico aumento de volumen, así como la acción de soluciones celulares concentradas, dañan la estructura coloidal de los productos. La magnitud del carácter de estas variaciones, en su mayoría irreversibles, dependen del tipo de producto y de la realización técnica del proceso de congelación. Generalmente, la calidad de los alimentos congelados se encuentra estrechamente relacionada con los procesos de congelación-descongelación.

Cuando el método de congelación es lento se forman cristales de hielo de gran tamaño; la formación de cristales de hielo durante el proceso de congelación y sus cambios durante el almacenamiento congelado afectan la microestructura de los alimentos congelados. Esta alteración de la microestructura puede conducir a la pérdida de calidad, tal como, pérdida de textura y agua por goteo y cambios en el color y sabor (Evans, 2013). La calidad sensorial de los alimentos congelados puede ser influenciada por el método de congelación empleado. Por ejemplo, la congelación lenta puede causar daño estructural extenso debido a la formación de cristales de hielo más grandes (Cer, 2007); en cambio, una congelación rápida permite retener agua dentro de las células y los cristales de hielo formados son de menor tamaño, lo que disminuye los daños mecánicos favoreciendo en la calidad del producto. La pérdida de textura debe evitarse, ya que este parámetro de calidad

de los alimentos congelados es uno de los más importantes desde el punto de vista del consumidor (Eduardo, 2008).

Hoy en día, el proceso de congelación es fuertemente implementado en todo el mundo, siendo uno de los más comunes métodos de conservación utilizados para todo tipo de alimentos comercializados: frutas (enteras, en puré o como concentrados de jugo) y vegetales (Visakh *et al.*, 2013).

Las mandarinas sufren de una corta vida de sabor en comparación con otras especies de cítricos. Sin embargo, la creciente preocupación con respecto al desarrollo de su composición, las mandarinas a menudo se envía a temperaturas mucho más bajas (Evans, 2013). Existen daños causados por el frío, algunas de estas afectaciones es el ablandamiento de la textura de los sacos de jugo, manchas en la corteza de la cascará, lesiones superficiales, ruptura de tejido y pérdida de agua y desordenes en el proceso de maduración. Para minimizar los daños causados por dicho proceso se han utilizado crioprotectores (Paula *et al.*, 2019), los cuales son componentes que interactúan con el agua, disminuyendo la velocidad de crecimiento de cristal de hielo y alterando su forma, mejorando la calidad y alargando la duración de los alimentos congelados. Como crioprotectores se cuenta con muchos compuestos, algunos de éstos son: azúcares, aminoácidos, polioles, metilaminas, polímeros de carbohidratos, polímeros sintéticos (polietilenglicol), proteínas (albúmina sérica), y algunas sales inorgánicas.

Los polímeros son macromoléculas compuestas de un gran número de unidades repetitivas idénticas o similares. Su organización es sobre una arquitectura molecular de tipo cadena que exhibe una multiplicidad de composiciones, estructuras y propiedades

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Cítricos

Los cítricos cultivados pertenecen botánicamente al orden de las Geraniales, familia de las Rutáceas, y a los géneros *Citrus*, *Fortunella* y *Ponciru*. El género *Citrus*, está compuesto por plantas de mediano a gran desarrollo, con hojas perennes y generalmente glabras. El fruto es una hespéride con número variable de semillas (Anderson *et. al.*, 2012).

Los cítricos están considerados entre las frutas frescas de mayor valor nutritivo. Ello se debe a un equilibrado contenido de agua, azúcares, ácidos, sales minerales, fibras y vitaminas, siendo indiscutible su elevado contenido en vitamina C. La vitamina C es un antioxidante capaz de prevenir la formación de radicales libres, encargados de ocasionar deterioro celular.

La actividad antioxidante denota la capacidad de un compuesto bioactivo para mantener la estructura y función celular despejando efectivamente radicales libres, inhibiendo las reacciones de peroxidación lipídica, y prevenir otro daño oxidativo (Zou *et al.*, 2016). También es una base de muchas otras funciones biológicas, como los anticancerígenos, antiinflamatorias y antienvjecimiento. Son ricos en fuentes de fitoquímicos útiles como vitaminas A, C y E; elementos minerales, flavonoides, cumarinas, carotenoides, pectinas y otros compuestos.

La vitamina C colabora además en el aprovechamiento de los hidratos de carbono y aminoácidos, y en la absorción de hierro a partir de fuentes no animales. Dado que acelera la producción y movilidad de glóbulos blancos, tendría efecto preventivo respecto a la gripe, resfríos y ciertos tipos de cáncer (Anderson *et. al.*, 2012).

1.2. Mandarina, morfología y anatomía

La mandarina (*Citrus tangerine*) es el fruto del mandarino. Pertenece al grupo de los cítricos, frutos llamados hesperidios con pulpa formada por un considerable número de gajos llenos de jugo con mucha vitamina C.

La mandarina es el cítrico más parecido a la naranja, aunque de menor tamaño, sabor más aromático y con mayor facilidad para quitar su piel. Por eso se considera una de las frutas más apreciadas.

1.2.1. Morfología y anatomía

El fruto es una baya modificada, con una cáscara delgada, y rugosa que se puede separar y que contiene numerosas glándulas oleosas, se denomina hesperidio. Esta parte de la morfología se ocupa en la estructura interna de los frutos.

La mandarina es un arbolillo de unos 2 o 3 m de altura, con hojas lanceoladas brillantes y oscuras; sus flores pequeñas y blancas, las culas son muy olorosas. Su color varía desde el anaranjado claro al más intenso y brillante. Su pulpa, de color amarillo y perfumada, es de sabor dulce y agradable (Hevia, 2007).

La fruta cítrica surge del crecimiento y desarrollo de un ovario, y consiste de 8-16 carpelos, agrupados y unidos al eje floral, que forma el núcleo de la fruta. Los carpelos forman lóculos, o segmentos, en los que las semillas y el jugo crecen sacos (vesículas). El pericarpio (corteza o cáscara) se divide en exocarpio o flavedo, y mesocarpio o albedo, el flavedo consiste en las capas de tejido más externas, que tienen epidermis y células del parénquima, cubiertas de cutículas. El flavedo es la parte externa de color y el albedo es el interior, incoloro (blanco) o, a veces teñida (como la toronja roja o las naranjas sanguinas). El flavedo consiste en el epicarpio propiamente dicho, la hipodermis, el mesocarpio externo, y glándulas sebáceas.

Por encima del epicarpio hay una piel o cutícula protectora de múltiples capas que es bastante compleja en origen, estructura y desarrollo. La cutícula consiste en una capa interna de cutina, que es un polímero heterogéneo de grasa ácidos y celulosa, y una capa externa que consiste en cutina (Ver Figura 1 y 2) (Ladaniya, 2013). Se sabe que las células epidérmicas sintetizan lípidos y ceras para depositar en la capa cutina.

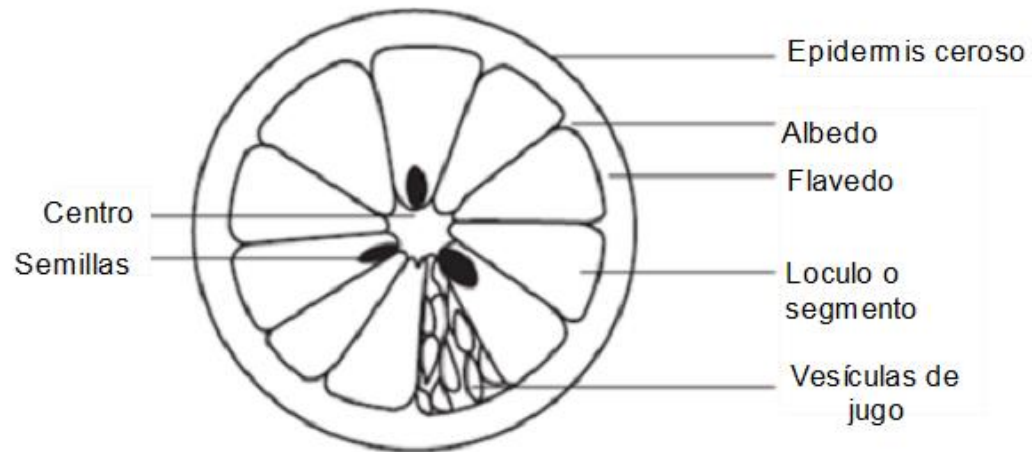


Figura 1. Sección transversal de cítricos (Ladaniya, 2013) .

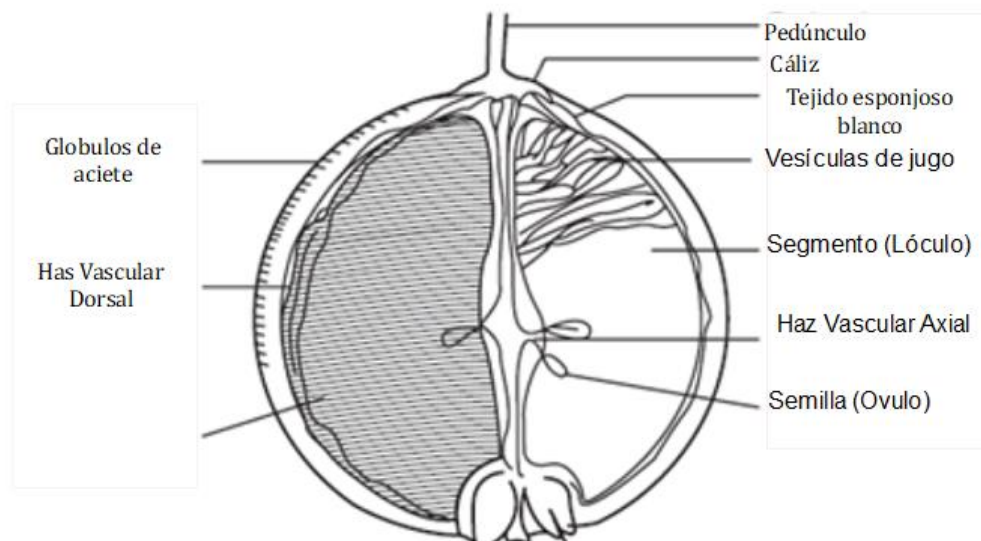


Figura 2. Sección longitudinal que muestra paquetes vasculares y frutales (Ladaniya, 2013).

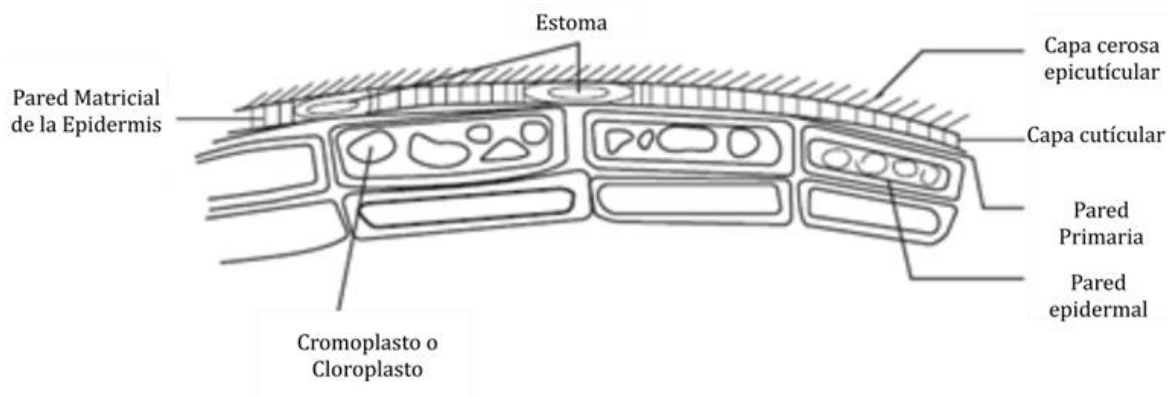


Figura 3. Representación esquemática de la capa epidérmica, cutina y cera en la corteza de la cáscara (Ladaniya, 2013).

La cera que se forma es la principal responsable de restringir la pérdida de agua de la cáscara, son de naturaleza compleja y están formados por alcoholes, parafina, aldehídos, cetonas, etc. La cutícula juega un papel esencial en el mantenimiento de alto contenido de agua dentro del tejido, que es necesario para el metabolismo normal.

Las células incoloras, llamadas hipodermis y mesocarpio externo, se encuentran inmediatamente debajo del epicarpio y contienen glándulas sebáceas. El tamaño de las glándulas sebáceas varía de 10 a 100 μm o más. Los terpenos (principalmente d-limoneno) y sesquiterpenos de aceite, en estas glándulas dan el aroma y sabor característico de las mandarinas.

1.2.2. Variedades

México ocupa el lugar número 13 como productor mundial, con más de 400 mil toneladas de producción anual en promedio (Hevia, 2007).

Existen muchas variedades procedentes de mutaciones entre diferentes especies, pero podemos clasificar la mayoría de las mandarinas en tres grupos:

- Satsuma
- Clementinas
- Comunes

- Otros (donde se engloban el resto de las mandarinas)

Entre las variedades se destacan:

- Satsumas: se conoce con este nombre al grupo de mandarinos originarios de Japón. Son las más precoces, con frutos de mayor tamaño y peor calidad gustativa, sin semilla. Destaca la variedad Clausellina. De todas las mandarinas, es la más resistente al frío. Las Satsumas se utilizan a nivel industrial para la fabricación de conserva de gajos en almíbar o en zumo natural ya que carecen de semillas (Spreen, 2010).
- Clementinas: con el nombre de Clementinas se conoce a un grupo de mandarinas cuyas características comerciales son las mismas: tamaño de los frutos entre pequeño y mediano, cuyo origen es el mandarino común. Son las más tardías, de mejor calidad gustativa y con semillas. Un inconveniente de esta variedad es su alternancia en la productividad, unos años proporcionan una fuerte producción de frutos de pequeño calibre y al año siguiente la producción es baja con frutos de calibre mayor. Destaca la variedad Clemenules (Paula *et al.*, 2019).
- Mandarinos comunes: dentro de este grupo se engloban todos los mandarinos de origen mediterráneo y que prácticamente se encuentran en campos de explotación familiar. Se caracterizan por sus buenas cualidades organolépticas pero la presencia de semillas y su escasa conservación hace que el mercado mundial no tenga mucha importancia (Spreen, 2010).
- Otros tipos: dentro de este grupo se engloban los mandarinos resultantes del cruzamiento de especies. Algunas de las variedades de este grupo poseen características comerciales interesantes, como por ejemplo Ortanique, ornamentales, mandarino Cleopatra, híbridos Nova, Citroyer, Fortune. Las variedades de este fruto suelen tener la piel más pegada a la pulpa. Dentro de este grupo de las variedades tardías más importantes son híbridas (Hevia, 2007).

1.3. Enzimas y antioxidantes

a) Enzimas

Las enzimas son catalizadores biológicos. Aumentan la tasa de reacciones químicas que tienen lugar dentro de las células vivas sin sufrir ningún cambio general. Cada enzima tiene un carácter bastante específico, que actúa sobre un sustrato o sustratos particulares para producir un producto o productos particulares (Zacarías, 2011).

Las enzimas son proteínas con una cierta secuencia de aminoácidos; las proteínas enzimáticas están involucradas en procesos metabólicos/bioquímicos. (Ladaniya, 2013). Las frutas regulan su metabolismo mediante la síntesis de enzimas y así es como se ajusta a cambios ambientales de su alrededor. Las actividades metabólicas como la maduración conducen a la síntesis de enzimas, seguido de reacciones anabólicas y catabólicas.

Las enzimas se encuentran en las paredes celulares, en el plasma y en el citoplasma disueltas en los componentes acuosos presentes en las células y organelos como (peroxisomas, glioxisomas, lisomas, cloroplastos, mitocondrias, ribosomas, vacuolas, membranas, etc.).

Los sistemas enzimáticos operan de manera altamente coordinada en el metabolismo de plantas y de frutos, jugando un papel importante en la fisiología de la planta y el fruto. Las enzimas relacionadas con la madurez son característicamente hidrolíticas en la naturaleza. El aumento de la síntesis de las proteínas indica un aumento en la actividad enzimática produciendo la maduración de los frutos (Ladaniya, 2013).

b) Antioxidantes

Hay más de 170 antioxidantes que han sido reportados en la literatura actual, incluyendo vitaminas, elementos minerales, compuestos fenólicos, terpenoides y pectinas.

La vitamina A es una clase de compuestos orgánicos solubles en grasa, que incluye retinol, retinal, ácido retinoico y varios provitamina A (b-caroteno) (Zou *et al.*, 2016).

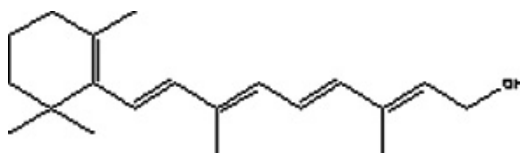


Figura 4. Estructura Básica de Vitamina A (V_A).

La vitamina C, generalmente conocida como ácido ascórbico, aunque en su estructura no existe ningún grupo carboxilo, ha sido propuesta desde hace muchos años como un eficaz antioxidante. Entre sus propiedades químicas sobresale su fuerte poder reductor, es decir, la facilidad con que se oxida reversiblemente a ácido dehidroascórbico (McClung, 2017).

Esta vitamina se encuentra en la pulpa y piel de la fruta; es un eliminador de radicales libres natural, que puede eliminar eficazmente una variedad de especies reactivas de oxígeno.

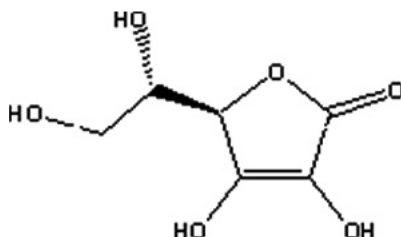


Figura 5. Estructura Básica de Vitamina C (V_C).

La vitamina E es una vitamina liposoluble que contiene un grupo de compuestos que incluyen tanto tocoferoles como tocotrienoles, estos compuestos se comportan como antioxidantes naturales y están presentes como componentes menores en muchos aceites vegetales y en hojas de algunas frutas; la vitamina E (tocoferoles y tocotrienoles), se encuentra principalmente en la cáscara y semillas

de la fruta. La vitamina E puede proteger membranas celulares contra el daño de la peroxidación lipídica a través de muchas maneras diferentes.

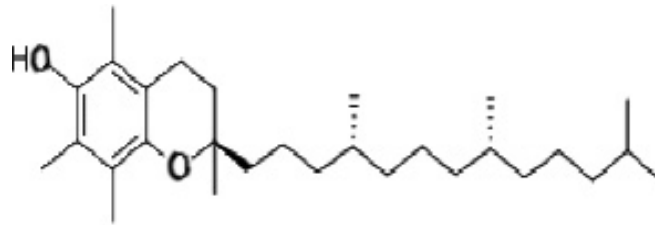


Figura 6. Estructura Básica de Vitamina E (V_E)

El aroma característico de la mandarina se puede atribuir a los aceites solubles en agua y de su alto punto de ebullición. Al aumentar la madurez y la temperatura de almacenamiento emanan las cantidades volátiles del fruto, la liberación de aroma volátil también aumenta enormemente si la cáscara se lesiona y si los sacos se rompen.

c) Enzimas responsables del deterioro

La fruta cruda contiene normalmente una carga enzimática indeseable, de enzimas capaces de clivar las sustancias pécticas, especialmente en el caso de las frutas cítricas. Las pectinoesterasas y poligalacturonasas presentes son capaces de clivar las pectinas naturales presentes en el fruto afectando la textura final.

Este tipo de frutos requiere una inactivación enzimática como proceso de estabilización. Para inactivar las enzimas pectolíticas que, de quedar activas, como en el proceso de frío (cold break o ruptura en frío), hidrolizan las pectinas naturales (Barreiro *et. al.*, 2006).

1.4. Proceso de congelación de alimentos

La congelación es uno de los procesos más antiguos y utilizados con mayor frecuencia para la conservación de alimentos a largo plazo. Hoy en día, el proceso

de congelación es fuertemente implementado en todo el mundo siendo uno de los más comunes métodos de conservación utilizados para todo tipo de alimentos comercializados: frutas (enteras, en puré o como concentrados de jugo) y vegetales; pescado y mariscos, incluidos platos preparados; carnes y productos horneados (es decir, pan, pasteles, pizzas), postres y una infinidad de platos precocidos (Visakh *et al.*, 2013).

La congelación representa un proceso de conservación para alimentos donde la temperatura del producto se reduce a un rango de temperatura que resulta en la formación de cristales de hielo dentro de la estructura del producto (Heldman, 2007).

Cuando la temperatura baja a menos de 0°C, hay una reducción en las cargas microbianas y la actividad microbiana; por lo tanto, la tasa de deterioro de los alimentos disminuye. Las temperaturas de congelación afectan materiales biológicos de varias maneras dependiendo de su composición química, microestructura y propiedades físicas. Las bajas temperaturas también tienen un fuerte impacto en la actividad enzimática y oxidativa (Visakh *et al.*, 2013).

El proceso de congelación se caracteriza por el cambio de fase del agua presente en los alimentos del estado líquido al estado sólido. Los otros componentes usuales en los alimentos, como carbohidratos, proteínas, grasas y minerales, no llevan a cabo este cambio de fase marcado; sólo los lípidos pueden también solidificar en este proceso (Barreiro, 2006).

El propósito es reducir la temperatura del producto tanto como sea económicamente factible en un esfuerzo para reducir las tasas de reacción de deterioro de la calidad del producto dentro del producto.

1.4.1. Curva de congelación

La representación esquemática de la cinética de congelación es la curva de congelación. Esta cinética influye en las características el crecimiento de los cristales de hielo, su tamaño y distribución está en función de la cinética de congelación (Madison, 1988).

Existen dos tipos de cinéticas, en la Figura 7, se puede observar la cinética de congelación del agua, en condiciones ideales, a 1 atm de presión y libre de impurezas; como primer paso se reduce la temperatura sin que se formen cristales, lo que se conoce como subenfriamiento (punto A), para iniciar la cristalización del agua es necesario que exista un estímulo, es decir que se alcance una masa crítica de nucleación (punto B), cuando esto ocurre la temperatura aumenta hasta 0°C , debido a la liberación de calor latente, después del subenfriamiento y representa el inicio de la cristalización del hielo. Cuando se alcanza el punto inicial de congelación, la temperatura se mantiene constante (punto C) debido a que el agua y el hielo se encuentran en equilibrio hasta que toda el agua se congela. Después de que el agua se ha congelado la temperatura disminuye hasta que se aproxima a la temperatura de la atmósfera de congelación (punto D).

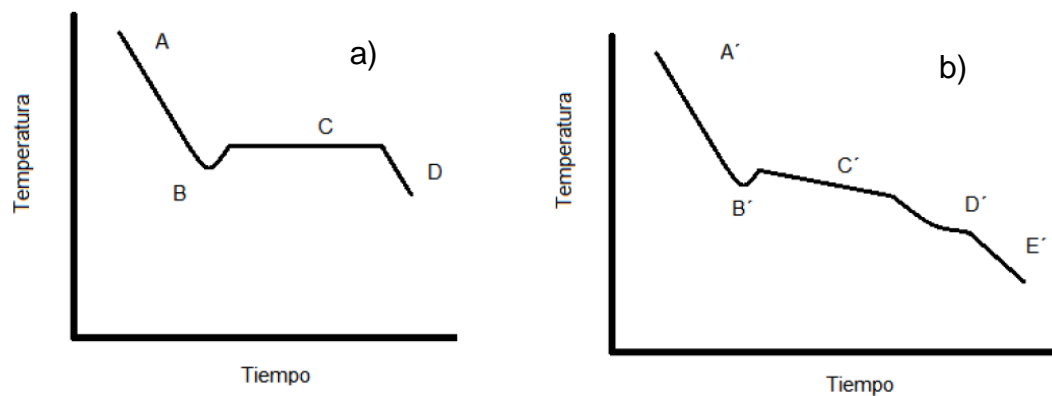


Figura 7. Cinética de congelación:
a) Cinética de congelación de agua pura; b) Cinética de congelación de solución acuosa (Heldman, 2007).

En el caso de soluciones Figura 7b, la cinética es diferente a la del agua, debido a la presencia de solutos que modifican la nucleación y el crecimiento de los cristales. El subenfriamiento (A') es menor al del agua debido a que los solutos promueven una nucleación heterogénea. El punto inicial de congelación es menor al del agua, ya que los solutos reducen el número de moléculas de agua disponibles para que se lleve a cabo la transición líquido-sólido; lo cual se relaciona con las propiedades coligativas que dependen de la concentración del soluto. Una vez que se alcanza el punto inicial de congelación, la temperatura sigue disminuyendo a medida que la

solución se congela y se separa más agua (C') debido a la concentración de los solutos que deprimen aún más, el punto de congelación. Ya que el agua disponible se cristalizó, la solución saturada puede experimentar una transición vítrea (D') y después el sistema sólido puede o no continuar enfriándose (E) dependiendo de las condiciones del proceso al que se someta.

1.4.2. Nucleación y Crecimiento de cristal de hielo

Nucleación: la nucleación es el reacomodo de las moléculas de agua en una partícula ordenada con un tamaño suficiente para sobrevivir y servir como sitio para promover el crecimiento del cristal. Es decir que aparecen núcleos de hielo o agentes indicadores para que la fase cristalina se desarrolle; para que esto ocurra es necesario el subenfriamiento del sistema, ya que se requiere superar una barrera de energía que acompaña a la formación de la nueva fase. En la superficie del cristal existe un intercambio de moléculas entre la fase líquida y sólida. Durante este proceso se libera calor latente de solidificación. La velocidad a la cual se lleva a cabo la nucleación depende de la temperatura del medio de congelación, la viscosidad del medio y el volumen de la muestra (Evans, 2013).

Durante el proceso de congelación ocurre la cristalización de las moléculas de agua, pasando del estado líquido al sólido. Los fenómenos que tienen lugar en el proceso de cristalización son de importancia en la congelación de alimentos, ya que ello incide sobre factores organolépticos y de calidad, en especial la textura y la capacidad de retención de agua de los tejidos en los alimentos (Eduardo, 2008).

Las tasas de congelación determinan el tipo, tamaño y distribución de la formación del cristal de hielo. Estas pueden ser hielo extracelular o intracelular (en agua rápidamente congelada). Los cristales de hielo se forman alrededor de un núcleo de cristalización, al cual se agregan moléculas de agua adecuadamente orientadas en la estructura cristalina que hacen crecer el cristal a medida que avanza el proceso de congelación. En este proceso son importantes dos factores: la velocidad de formación de los núcleos de cristalización y la velocidad de crecimiento de cristales de hielo (Gómez-Sánchez, *et al.*, 2007).

La congelación lenta produce menos cristales de hielo, pero más grandes, en forma de aguja, mientras en la congelación rápida produce un mayor número de cristales esféricos, transparentes y de tamaño más pequeños. Si el tamaño de cristal es grande o pequeño depende del propósito de congelación (Evans, 2013). El proceso de congelación incluye dos pasos sucesivos: la formación de los cristales de hielo y el subsecuente aumento en el tamaño del cristal de hielo.

El tamaño y número de los cristales de hielo formados influyen considerablemente en la textura del producto. Los cristales de hielo grandes perjudican la calidad de los alimentos, debiéndose a su formación por tres causas fundamentales que deben tenerse presentes para evitarse (Carranza, 2000):

- Velocidad de congelación lenta
- Almacenamiento del producto congelado a temperaturas relativamente altas por tiempos largos
- Fluctuaciones en la temperatura de almacenamiento (± 5 °C).

El crecimiento cristalino requiere que las moléculas de agua puedan difundirse hasta la superficie de los núcleos cristalinos. A medida que se forman dichos núcleos estables las moléculas se adicionan en la interfase sólido-líquido. El tamaño y número de cristales formados depende de la velocidad de nucleación. Con altos grados de subenfriamiento, los cuales se obtienen con velocidades altas de congelación, la velocidad de nucleación es mayor que la de crecimiento de cristal, formándose varios núcleos en los que se distribuye el hielo en numerosos y pequeños cristales suelen ser grandes. Por otra parte, el tamaño de cristales está íntimamente relacionado con el número de núcleos de cristalización existentes. Pocos núcleos originan pocos cristales, pero grandes; muchos núcleos originan muchos cristales, pero más pequeños.

1.4.3. Importancia de la velocidad de congelación

La velocidad de congelación es la velocidad con que la temperatura del producto disminuye desde su temperatura inicial hasta conseguir la congelación en el centro térmico del producto y se expresa en °C/h; es el cociente de la diferencia entre la

temperatura inicial y temperatura final entre la duración de la congelación (Olivera, 2009), y los valores de velocidad superiores a 5 °C/min suponen una congelación rápida; valores inferiores a 1 °C/min una congelación lenta.

Se pueden realizar dos tipos de congelación:

- Congelación rápida; provoca cristales más pequeños, dando como resultado pocas pérdidas de líquido celular por exudación y bajo ablandamiento de los tejidos durante la descongelación.
- Congelación lenta; provoca cristales de hielo de gran tamaño, dando como resultado un producto de baja calidad, por la elevada pérdida de exudado durante la descongelación (Olivera, 2009).

La velocidad de congelación es uno de los principales factores que afecta la calidad de los alimentos, ya que determina el tamaño de los cristales de hielo y durante el almacenamiento, estos cristales de hielo crecen y causan daños en las células por alteración de las membranas, paredes celulares, y la estructura interna de los alimentos de modo que cuando se descongela, el producto es diferente del original en textura y sabor. Cuando mayor sea la velocidad de congelación, mayor es la nucleación, por lo tanto es el número de cristales más pequeños (Evans, 2013).

En la conservación por congelación a escala industrial se considera suficientes las velocidades de congelación superiores a 0.5 °C/h para productos envasados individualmente, y velocidades de 5 °C/h para productos a granel. Al congelar productos de grandes dimensiones, no son objetables a bajas velocidades de congelación de < 0.5 °C/h (Eduardo, 2008).

1.4.4. Métodos de congelación

La congelación de alimentos es un método de conservación que depende de la reducción de la temperatura del producto a niveles por debajo de su punto de congelación, es decir, el inicio de la formación de cristales de hielo (Martinez *et al.*, 2007).

Los métodos de congelación son muy variados y el método a emplear depende principalmente de las características del alimento (Evans, 2013), los cuales pueden ser clasificados de acuerdo con la temperatura aplicada (arriba o debajo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), el producto procesado (sólido o líquido), el medio de congelación (aire, superficie fría, líquido), y el camino de proceso (continuo o batch) (Martinez *et al.*, 2007).

Los sistemas o métodos de congelación se pueden clasificar en dos grupos: sistemas de contacto directo y contacto indirecto. Esta clasificación se basa en el tipo de contacto entre la superficie del producto y el medio de refrigeración (Heldman, 2007). El proceso de congelación se lleva a cabo en sistemas diseñados para que el alimento entre en contacto con un medio a bajas temperaturas y que permita la remoción de calores complementando con los sistemas de congelación.

Varios tipos de métodos de congelación se utilizan en la industria alimentaria, tales como congeladores de placas, congeladores de chorro de aire, congeladores de contacto directo y congeladores criogénicos de inmersión (Evans, 2013).

1.4.4.1. Sistemas de contacto directo

Estos sistemas intentan poner el medio frío en contacto con la superficie máxima del producto. En general se esperaría que los sistemas de este tipo de congelación sean altamente eficientes, ya que las barreras de transferencia de calor son reducido a un mínimo (Heldman, 2007).

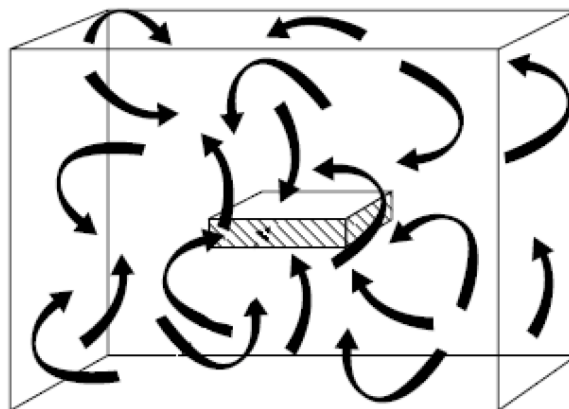


Figura 8. Diagrama esquemático de la congelación por contacto directo.

Un sistema de congelación por chorro de aire se considera contacto directo cuando el aire a baja temperatura es puesto en contacto directo con un producto durante la congelación.

a) Congelación por superficie

La congelación por contacto se da en equipos de placas, en las cuales circula en su interior un refrigerante a menor temperatura, el cual retira el calor sensible y latente del producto hasta congelarlo. Por lo general se utiliza en productos que no sobrepasan los 60 mm de espesor y que son mecánicamente resistentes.

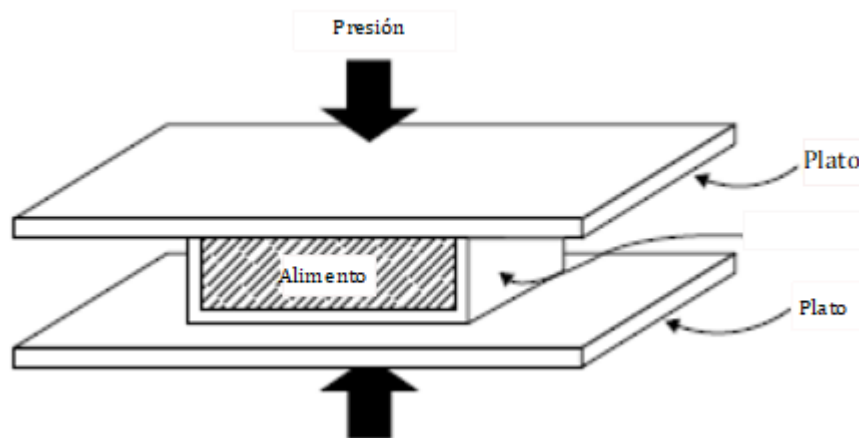


Figura 9. Esquema del sistema de congelación de placas (Heldman, 2007).

El uso de presión tiende a reducir la resistencia a la transferencia de calor, y reduce los tiempos de congelación. Los sistemas de congelación de placas son altamente eficientes, pero están limitados a la forma del producto.

b) Congeladores por inmersión y aspersion, con contacto directo

En la congelación por este método, el equipo empleado no es complicado. Se utilizan líquidos criogénicos como el nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2), salmueras, mezclas no tóxicas de agua y solutos (ejemplo, azúcar-alcohol diluidos en agua) y otros líquidos (ejemplo, propilen-glicol/agua) (Martinez *et al.*, 2007).

Existe un contacto directo entre el empaque o el alimento y el medio refrigerante. El medio refrigerante para el enfriamiento generalmente se utiliza como vehículo para la transferencia de calor entre el producto y otros refrigerantes primarios, como amoníaco o freón, el cual opera en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor y que enfría al medio secundario en forma indirecta a través de un intercambiador de calor o serpentín (Barreiro, 2006).

Los empaques o el alimento se sumergen directamente en el medio refrigerante o son rociados por éste. El medio refrigerante debe ser no tóxico o contaminante del alimento, pudiéndose utilizar salmueras de cloruro de sodio, propilén glicol o soluciones azucaradas.

Los solutos utilizados deben ser seguros para el producto en términos de salud, sabor y color, y el producto debe ser más denso que los fluidos.

En estos congeladores se pueden alcanzar coeficientes de transferencia de calor en el orden de $48.82 \text{ kcal/hr/m}^2/^\circ\text{C}$, dependiendo de la velocidad del medio de enfriamiento sobre el alimento (Barreiro, 2006).

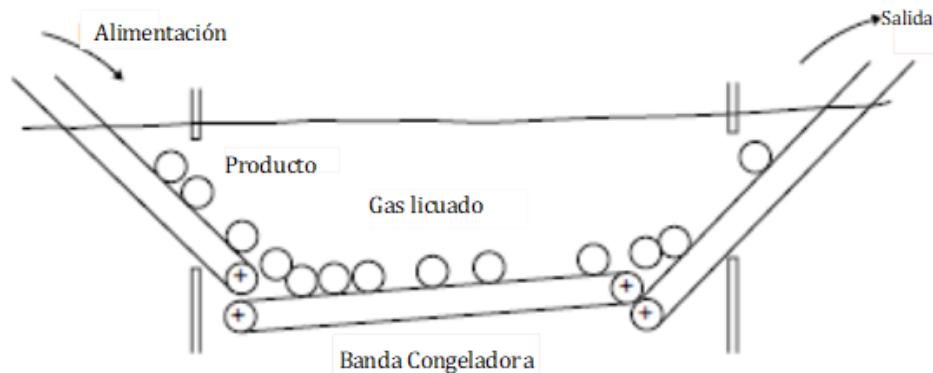


Figura 10. Esquematación de un sistema de congelación por inmersión (Heldman & Lund, 2007).

c) Congelación ultrarrápida:

La congelación ultrarrápida se lleva a cabo mediante la aspersion o inmersión en refrigerantes criogénicos, como el nitrógeno líquido (LNF) y el dióxido de carbono

líquido, con temperatura de ebullición a presión atmosférica de -195.8°C y -98.3°C , respectivamente.

En la congelación criogénica, los gases licuados se colocan en contacto directo con los alimentos. La formación de pequeños cristales de hielo reduce en gran medida el daño causado por la ruptura celular, preservando el color, la textura, el sabor y el valor nutricional (Heldman, 2007).

Las tasas de remoción de calor en estos procesos son muy rápidas, reflejándose en descensos de la temperatura entre 5 y $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (Barreiro, 2006).

1.4.4.2. Sistemas de contacto indirecto

La mayoría de los alimentos congelados son el resultado del uso de sistemas de congelación de contacto indirecto. Como se ilustra esquemáticamente en la Figura 11, el alimento está separado del refrigerante por algún tipo de barrera. Estas barreras incluirían la superficie del paquete del producto, así como los componentes estructurales del sistema de congelación.

a) Equipo de congelación por aire

Flujos de aire a bajas temperaturas son empleados en los sistemas de congelación de alimentos por medio de túneles, bandas transportadoras y equipos de lecho fluidizado. El flujo de aire se aplica continuamente al producto y, dependiendo del equipo de congelación, es flujo horizontal o vertical. En el congelador de túnel, el flujo de aire que prevalece es horizontal. En los equipos de lecho fluidizado, el flujo de aire es vertical ascendente, y en el equipo de congelación de bandas, ambos flujos de aire son utilizados. Dado que el calor específico del aire es bajo, las cantidades de aire que se necesitan para la congelación son grandes (Martinez *et al.*, 2007).

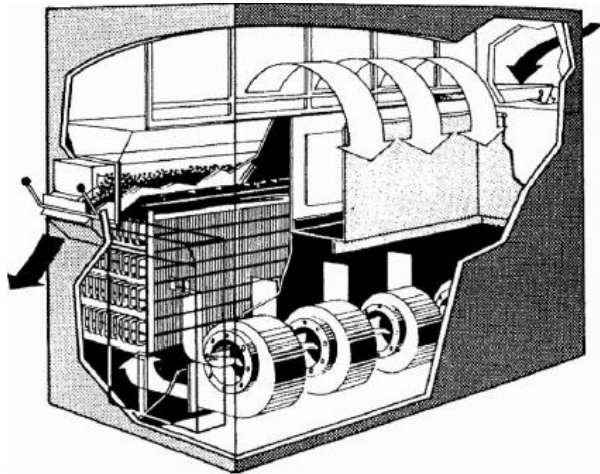


Figura 11. Sistemas de Congelación por lecho Fluidizado (Heldman, 2007).

b) Congeladores de aire forzado

En estos equipos el aire se enfría al pasar por un intercambiador de calor (evaporador) por el que circula refrigerante en un ciclo de compresión de vapor, a un nivel entre -18 y -35 °C. el aire frío se pasa a velocidades elevadas por la superficie del alimento, con coeficientes de transferencia de calor en el orden de 9.76 a 24.41 kcal/hr/m²/°C (Barreiro, 2006).

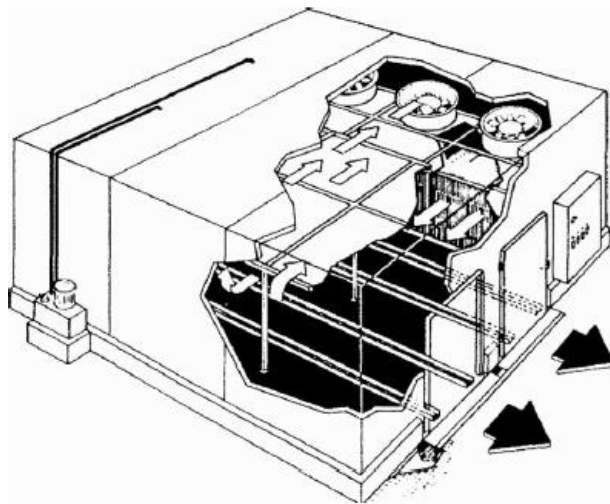


Figura 12. Esquematización de la congelación por aire forzado (Heldman, 2007).

d) Congeladores de túnel

Este equipo consta de un cuarto aislado con una sola puerta, o dos puertas con una operación continua. La diferencia entre los tipos de túneles es que la temperatura del aire varía de -30 a -10 °C, las cámaras de aislamiento son gruesas, y la velocidad de aire es alta (3-6 m/s). Este equipo requiere intercambiador de calor y ventiladores de alta potencia. El aumento de velocidad de aire reduce el tiempo de congelación (Martinez *et al.*, 2007).

e) Congeladores de lecho fluidizado

Es un método de congelación rápido individual (IQF), usado en congelación de piezas pequeñas o cortes de piezas de alimentos (diámetro aproximadamente 3 cm hasta un largo de 12 cm, como chicharos, papas a la francesa, zanahorias rebanadas o cortadas, frijoles y champiñones; las piezas de alimentos son congeladas individualmente (Martinez *et al.*, 2007).

El equipo consta de una banda inclinada, ventiladores (usualmente radiales) con flujo de aire descendente, y el aire de enfriamiento del intercambiador de calor se encuentra a -40 °C (ver Figura 13).

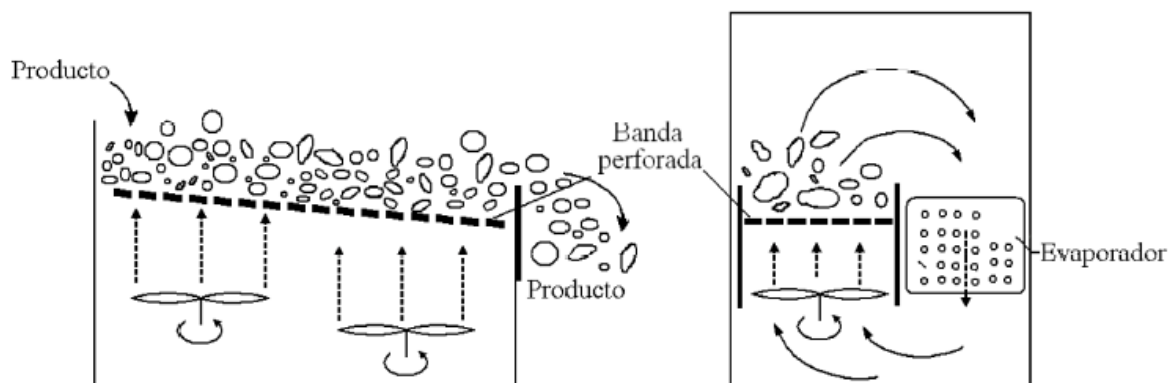


Figura 13. Congelador de lecho fluidizado (Martinez *et al.*, 2007).

f) Congeladores de banda

Este equipo consta de bandas moviéndose a través de un flujo de aire frío (ver Figura 14 y 15). Dichas bandas permiten el paso del aire a través de ellas. Este tipo de equipo es empleado para piezas sensibles y relativamente grandes de alimento; ejemplos de productos congelados por este sistema son rodajas de manzana, coliflor, fresas y alcachofas.

En la primera zona, el aire recircula vigorosamente, causando una congelación en la superficie del producto (congelación de corteza). La congelación del producto es completada en la segunda zona (Dempsey, 2011).

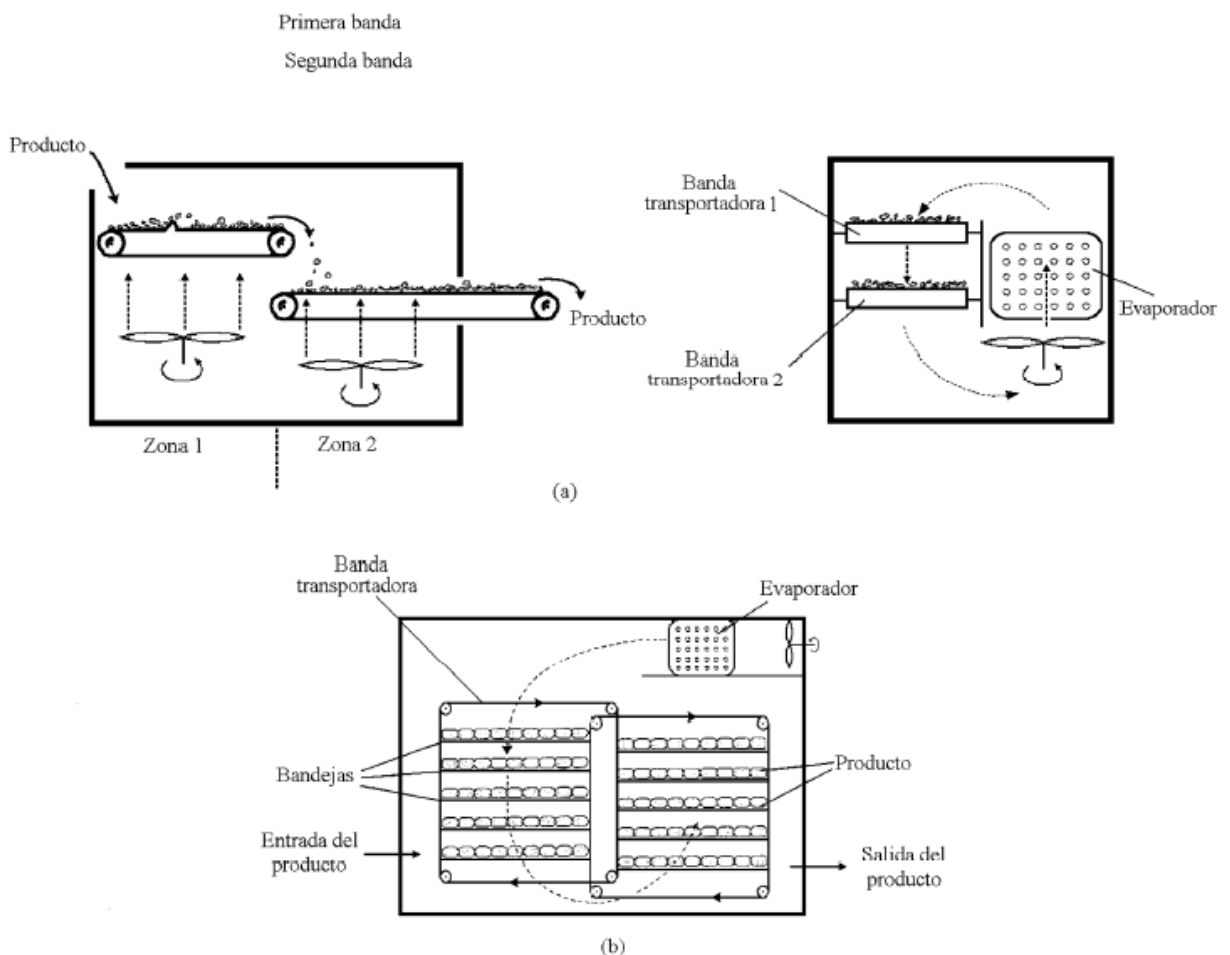


Figura 14. Congelador de bandas transportadoras (Martinez *et al.*, 2007).

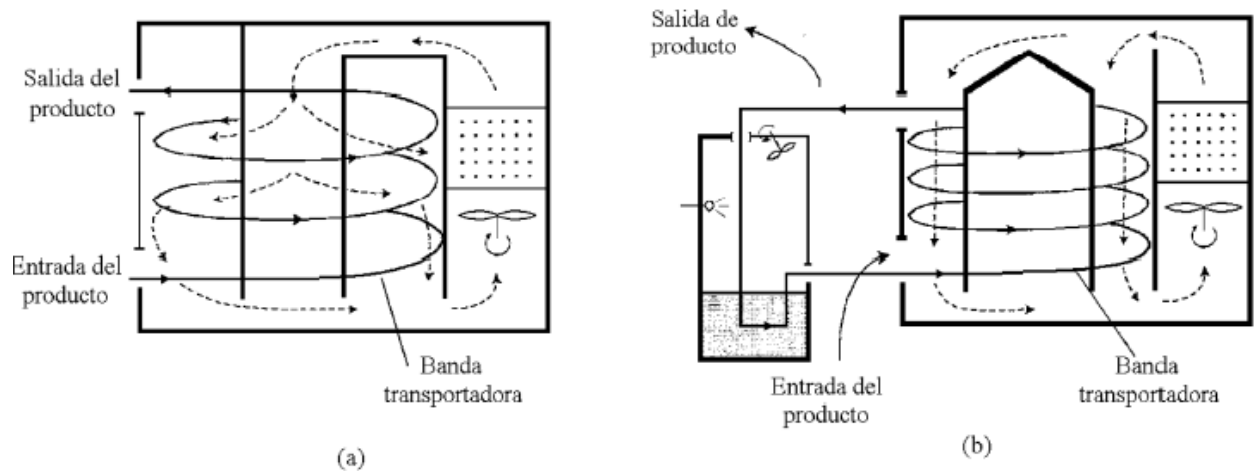


Figura 15. Congelador de bandas transportadoras en espiral o de curva (Martinez *et al.*, 2007).

1.5. Almacenamiento congelado de mandarina

La congelación de frutas constituye un proceso de conservación importante, debido a que pueden ser transportadas a mercados remotos o pueden ser almacenadas para la manufactura de jaleas, jugos y jarabes (Cer, 2007). La fruta con una estructura delicada tiene más probabilidad de sufrir daño celular (Evans, 2013).

La susceptibilidad de los cítricos a las bajas temperaturas de almacenamiento depende, entre otros factores, de la especie y variedad (Vázquez, 2003). La fruta es pasada por un túnel de aire frío por convección forzada, en donde la temperatura se reduce hasta $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de almacenamiento, transporte y distribución es de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El producto de exportación y de uso industrial se empaca preferentemente en bolsas plásticas dobles de polietileno. Posteriormente el producto se congela en cuartos de convección forzada de aire (blast) a alta velocidad y con temperatura de alrededor de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta que la temperatura se de al menos $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, el producto congelado se almacena a -18 o $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Barreiro, 2006). El transporte y distribución del producto se debe hacer a temperaturas de congelación, normalmente máximo a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y preferentemente menos de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En el comercio internacional, suele transportarse frutas tropicales congeladas, especialmente el marítimo, donde pueden ocurrir daños por congelación, afectándose la textura y otras propiedades del alimento.

1.6. Descongelación

Los alimentos congelados deben tratarse antes de su empleo, con objeto de prepararlos para el consumo o para posteriores preparaciones, de acuerdo con la clase y finalidad de utilización y de la naturaleza del tratamiento de congelación (Eduardo, 2008). Estas operaciones, denominadas muchas veces en la tecnología frigorífica como restitución de los alimentos congelados, constituyen la última fase del tratamiento de congelación y tiene por objeto poner a los productos en un estado lo más cercano posible de ser congelados (Agoulon, 2012). Su importancia con respecto a la descongelación, es decir, el proceso de elevación paulatina de la temperatura del producto congelado hasta una temperatura superior al punto inicial de congelación (Heldman, 2007).

La finalidad de la descongelación es conseguir la fusión de los cristales de hielo mediante el suministro de cierto tipo de energía al producto, de tal forma que recupere al máximo sus características iniciales, con un mínimo de pérdida en calidad (Helen, 2000).

Al ser la conductividad térmica del agua líquida menor que la del hielo, la transmisión de calor externo resulta más difícil a medida que progresa la descongelación del alimento. Por consiguiente, el tiempo que un alimento tarda en descongelarse dependerá tanto de su tamaño y forma, como de la conductividad térmica del envase (Cai *et al.*, 2008).

1.7. Crioprotectores

La congelación y descongelación de los alimentos puede tener un efecto perjudicial en las propiedades sensoriales y la capacidad de retención de agua, como resultado de una ruptura de las células o de los componentes celulares o cambios en la estructura de ciertas macromoléculas (Ötles, 2012).

Para minimizar los daños causados por dichos procesos se han utilizado crioprotectores (Ötles, 2012), los cuales son componentes que interactúan con el agua, disminuyendo la velocidad de crecimiento del cristal de hielo y alterando su forma, mejorando la calidad y alargando la duración de los alimentos congelados.

El término crioprotector incluye todos los compuestos que contribuyen a prevenir los cambios perjudiciales en los alimentos causados por los procesos de congelación y descongelación o el almacenamiento en congelación. Estas sustancias pueden añadirse durante el procesamiento y en la formulación del producto o producidos de forma natural en organismos vivos de los cuales derivan los alimentos (Eduardo, 2008). En el caso de los alimentos procesados, en los cuales el mezclado con el crioprotector es posible, la función consiste en estabilizar un componente, el cual es un biopolímero. Para los alimentos con estructura celular como lo son las frutas, verduras y carnes, la crioprotección consiste en estabilizar la estructura, esto se logra controlando el movimiento del agua para prevenir el colapso celular.

Como crioprotectores se cuenta con muchos compuestos, algunos de éstos son: azúcares, aminoácidos, polioles, metilaminas, polímeros de carbohidratos, polímeros sintéticos (polietilenglicol), proteínas (albúmina sérica), y algunas sales inorgánicas (fosfato de potasio y sulfato de amonio).

1.7.1. Polisacáridos como crioprotectores en alimentos

Los polisacáridos son los polímeros naturales más versátiles debido al amplio espectro de propiedades químicas, físicas y funcionales que confluyen en los organismos vivos, tales como conferir estructura, almacenar energía y otras funciones mucho más especializadas, tales como reconocimiento y adhesión en células eucariontes, señalización y activación de procesos de resistencia en plantas, formación de biopelículas en microorganismos, entre otras.

Es relevante que algunos de estos biopolímeros combinan propiedades fisicoquímicas como la capacidad de formar sistemas tipo hidrogeles, micro y nanopartículas (Goycoolea *et al.*, 2013). Estos sistemas actualmente tienen alto

potencial para el desarrollo de una nueva generación de nanopartículas coloidales poliméricas.

La funcionalidad de los polímeros es variada, ya que poseen características únicas debidas a su estructura molecular. La presencia de grupos polares y no polares los hace capaces de establecer interacciones y controlar la reología y textura de los sistemas acuosos mediante la estabilización de las emulsiones, suspensiones y espumas (Bajpai *et al.*, 2018).

Los hidrocoloides y las proteínas son dos tipos de biopolímeros que pueden afectar la cristalización del hielo (Maity *et al.*, 2018). Los biopolímeros son capaces de modificar la viscosidad del medio en el que se encuentran y de formar geles, cuya firmeza se ha asociado con la inhibición del crecimiento de cristalización se reduce a medida que aumenta el tiempo de maduración del gel y su elasticidad. Por esta razón se puede decir que existe un traslape entre la crioprotección y otro tipo de estabilización de alimentos.

1.7.2. Almidones modificados de maíz ceroso

La mezcla de almidones con otros polisacáridos es usada comúnmente en la industria de alimentos, ya que proporcionan una amplia variedad de propiedades físicas, reológicas y texturales, mejoran el desempeño durante los procesos, ayudan a diversificar las aplicaciones y coadyuvan en la obtención de nuevos productos. Las propiedades reológicas y texturales de las mezclas de almidón con hidrocoloides dependen del tipo de ambos componentes y de las condiciones de preparación. El almidón es abundante en la naturaleza, económico y es biopolímero no tóxico, naturalmente renovable y biodegradable (Liu *et al.*, 2019).

Los almidones modificados, como aditivos alimentarios, se utilizan para controlar la textura y las propiedades reológicas del producto. La modificación del almidón se puede efectuar en las rutas químicas, físicas o enzimáticas, y como resultado de esos procesos, los productos obtenidos constituyen una adición importante en los procesos de producción en varias ramas de la industria alimentaria. Los almidones modificados exhiben diversas propiedades variadas en relación con el almidón

nativo. Con mayor frecuencia, la modificación afecta las propiedades funcionales del almidón como solubilidad, capacidad de retención de agua, temperatura de gelatinización y viscosidad, transparencia y estabilidad reológica de geles (Włodarczyk-Stasiak *et al.*, 2017).

El almidón de maíz ceroso es un polisacárido cuyo empleo en la industria alimentaria ha tomado un gran auge. El almidón de maíz ceroso por estar constituido fundamentalmente de amilopectina (prácticamente exento de amilosa), se utiliza como espesante, estabilizante y texturizante, y el entrecruzamiento le proporciona estabilidad en un amplio intervalo de pH, altas temperaturas, agitación mecánica y ciclos de congelación-descongelación, además de conferir claridad a las pastas (Casas-Alencáster, 2005).

Existe un creciente interés en el uso de almidón de maíz ceroso como material precursor en la síntesis de nanopartículas para diversas aplicaciones en la industria alimentaria y biomédicas, así como aplicaciones en la industria de transporte de medicamentos (Qiu *et al.*, 2016).

1.7.3. Fructanos de Agave

Los fructanos de agave son ingredientes naturales con alto potencial en las industrias alimentarias y farmacéutica. Los fructanos constituyen los principales carbohidratos de reserva en algunas familias del reino vegetal, son polímeros de fructosa de cadena lineal unidas por enlaces glucosídicos β (2,1) y β (2,6), sólo contienen un residuo de glucosa en el extremo reductor de la molécula y pueden alcanzar grados de polimerización hasta de 200 unidades de fructosa, lo cual depende de la fuente botánica, así como de las condiciones agronómicas del cultivo y la edad de la planta (Rodríguez-González *et al.*, 2019). Entre las principales fuentes potenciales de fructanos destacan los tubérculos de la planta de alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus*), las raíces de la planta de achicoria (*Chocory intybus*), los tubérculos de la planta de dalia (Toriz *et al.*, 2007), y las cabezas o piñas de las plantas del género *Agave* como el *Agave tequilero* (*Agave Tequilana* Weber Azul), el cual se cultiva de manera intensiva en nuestro país (Toriz *et al.*, 2007).

Además, los fructanos se usan como ingredientes mejoradores de la consistencia y la textura para los productos alimenticios, reemplazando el almidón y la grasa, reduciendo así el contenido energético de los alimentos (Pintor-Jardines *et al.*, 2018).

Para comprender las propiedades inmunomoduladores de los fructanos, es necesario analizar la estructura química y la clasificación de las moléculas de fructanos porque su estructura determina su función. Estructuralmente, los fructanos son oligo y polisacáridos derivados de fructosa que se clasifican según su fructosilo, enlace como inulinas y levans, con residuos de fructosa lineales unidos por enlaces β (2-1) y β (2-6). Los polímeros entre 2 y 10 moléculas de fructosa se conocen como fructooligosacáridos (FOS), mientras que un fructano debidamente nombrado es un polisacárido con un grado de polimerización más de 10 moléculas de fructosa (Moreno-Vilet, *et al.*, 2016).

Los fructanos de agave se usan como ingredientes mejoradores de la consistencia y la textura para los productos alimenticios, reemplazando el almidón y la grasa, reduciendo así el contenido energético de los alimentos (Moreno-Vilet *et al.*, 2016).

Una fuente natural rica en fructanos son las plantas de agave. El *agave Tequilana Weber Azul* es el más utilizado para la producción de jarabe y fructanos. Más de 80% en peso del contenido de carbohidratos en agave azul se origina de fructanos.

Los fructanos de agave tienen un grado estimado de polimerización de entre 3 a 30 unidades, su estructura molecular resulta una mezcla compleja de fructanos lineales tipo inulina con enlaces β (2-1), y ramificados: levanos con enlaces β (2-6).

1.8. Nanotecnología

La nanotecnología es el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas controlando el tamaño y la forma a escala nanométrica. Nanotecnología es la creación de materiales funcionales, dispositivos y sistemas a través del control de la materia en la escala nanométrica (1-100 nm), y la explotación de nuevos fenómenos y propiedades (físicas, químicos, biológicos, mecánicos, eléctricos) en esta misma escala (Ávalos Fúnez *et al.*, 2016).

La industria alimentaria está invirtiendo en mecanismos y procedimientos para utilizar la nanotecnología para mejorar procesos de producción y producir productos alimenticios con mejores funcionalidades más convenientes (Visakh *et al.*, 2013).

El uso de la nanotecnología en el envasado de alimentos es una aplicación prometedora dirigida para lograr una mayor vida útil de los productos alimenticios, dándoles mayor seguridad.

El uso de nanomateriales en formulaciones de alimentos tiene el potencial para producir sabores, colorantes y aditivos nutricionales más fuertes, también mejora las operaciones de producción, reduciendo los costos de ingredientes y procesamiento (Visakh *et al.*, 2013).

El interés de esta tecnología radica en el hecho de que su pequeño tamaño comporta propiedades físicas y químicas que difieren significativamente de las que presenta el mismo material a mayor escala. Por esta capacidad ventajosa es que les otorga este distinto comportamiento, las NPs pueden formar parte de la composición de productos y aportarles nuevas propiedades (Ávalos Fúnez *et al.*, 2016).

1.8.1. Nanopartículas

Se denomina nanopartícula a un sólido coloidal, formado de materiales aceptados como seguros (polímeros biodegradables o no, lípidos, proteínas, etc.) en los que una sustancia de interés “activo” puede ser incorporada, adsorbida o unida químicamente con un tamaño que oscila entre los 10 y 1000 nm (Zambrano-Zaragoza, 2013). Las nanopartículas presentan varias ventajas con respecto de los sistemas coloidales; tienen estabilidad física durante el almacenamiento; conservan su integridad al contacto con fluidos biológicos; son de fácil preparación con diversas técnicas disponibles y reproducibilidad en la producción lote a lote.

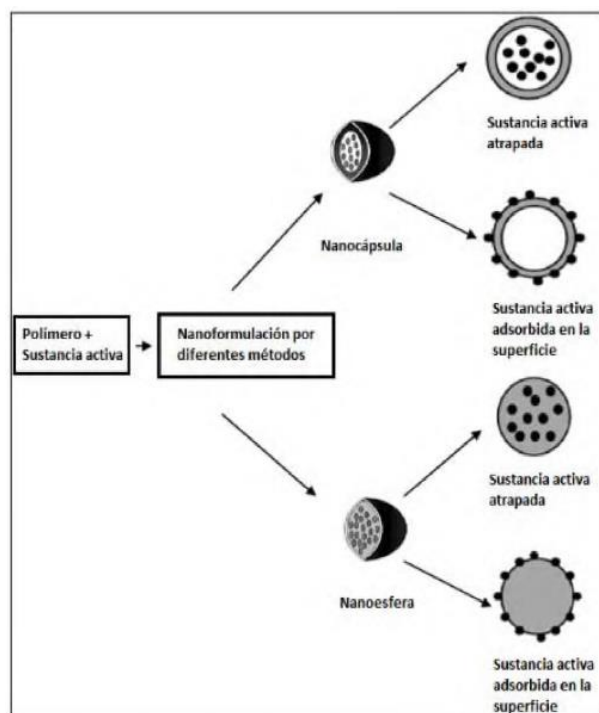


Figura 16. Nano capsulas y nano esferas (Zambrano-Zaragoza, 2013)

1.8.2. Nanoliposomas

Dentro de la nanotecnología se encuentra el estudio de estructuras como los liposomas , nanoemulsiones, microemulsiones, nanopartículas lipídicas sólidas y nanopartículas biopoliméricas como sistemas de encapsulación de compuestos bioactivos, utilizados en alimentos funcionales (Garcia *et al.*, 2017).

Los liposomas son estructuras vesiculares conformadas de lípidos organizados en bicapas o multicapas. Estas estructuras son similares a la estructura de la membrana lipídica. Los nanoliposomas presentan varias ventajas como una mejoría en la estabilidad fisicoquímica a los compuestos encapsulados, mejora la dispersabilidad en agua y no necesariamente influyen en la efectividad biológica del compuesto.

La actividad biológica de los compuestos encapsulados en liposomas puede no ser alterada. A pesar de ello, no se debe perder de vista que los nanoliposomas pueden producir una liberación controlada de su contenido. Esto lleva a cinéticas diferentes del compuesto original en el transporte a través del cuerpo. Los compuestos

encapsulados en liposomas, deben ser endocitados para poder ser transferidos al interior de la célula, lo que implica que el transporte a través de las membranas biológicas estará supeditado a dicho proceso. Ello podría contrastar con el transporte del compuesto sin encapsular que puede ser diferente (difusión simple, difusión facilitada, transporte activo) y que dependerá de sus propiedades fisicoquímicas y de los mecanismos biológicos disponibles para dicho compuesto (García *et al.*, 2017).

Los factores que pueden afectar la eficiencia biológica de los liposomas son factores como el pH y los componentes lipídicos utilizados pueden afectar la estabilidad del liposoma y la cantidad del compuesto encapsulado.

1.8.3. Aceite esencial de naranja para la encapsulación

La naranja (*Citrus sinensis*) es una fuente de aceite esencial concentrado en el exocarpio de la fruta, que se compone de la epidermis y una capa de células glandulares reportado por (Amaral do Evangelho *et al.*, 2019). Se generan grandes volúmenes de subproductos durante el procesamiento de naranjas, y pueden ser potencialmente utilizadas en la industria alimentaria para la extracción de aceite esencial.

Las propiedades antimicrobianas de varios aceites esenciales han sido ampliamente estudiadas como aditivos en películas biodegradables. Los aceites esenciales tienen una naturaleza aceitosa y volátil que puede afectar la integridad o el grado de hidrofobicidad de las películas poliméricas, cambiando su mecánica y propiedades de barrera (Amaral do Evangelho *et al.*, 2019).

El aceite esencial de naranja que tiene propiedades antidepresivas, sedantes, aroma-terapéutica, se utiliza en la industria de fármacos y como cosméticos porque limpia y revive la piel opaca, ayudando la eliminación de excesos del fluido y toxinas, también es usado por sus propiedades germicidas, antioxidantes y anticancerígenas en la producción de fármacos; también es utilizado en la industria de saborizantes, agentes de limpieza y perfumes. El aceite esencial de naranja contiene más de un 90% de d-limoneno, componente mayoritario en su composición

normal y además en menor proporción poseen una gran cantidad de terpenos. Este aceite esencial contiene compuestos fenólicos que son de gran interés debido a su actividad antifúngica. El efecto del aceite esencial se ve favorecido por bajas temperaturas, bajo pH y bajos niveles de oxígeno.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

2.1. Problema

A nivel mundial, existe un gran problema en relación con el desperdicio de alimentos previo a su consumo, lo que representa una merma en la producción. Siendo, las frutas las que tienen las mayores tasas de desperdicio representando entre el 40 a 50 % del total de la producción. Para prolongar su vida útil suelen refrigerarse o congelarse, disminuyendo así la tasa de deterioro. En el caso de los frutos congelados, es muy importante considerar los efectos de la velocidad a la que el agua se transforma en cristales de hielo, así, una congelación lenta suele tener un efecto negativo en la integridad de la estructura celular con lo que se provoca un daño por frío que tendrá efectos negativos en cuanto a la calidad del producto y por ende su funcionalidad al momento del consumo o utilización en otro proceso. Para contrarrestar este efecto se han planteado alternativas que protejan las estructuras celulares durante el proceso de congelación, minimizando los cambios y funcionalidad del alimento. Una de estas alternativas es utilizar velocidades de congelación rápidas, otra alternativa es la utilización de crioprotectores que son sustancias que tienen la capacidad de interactuar con los componentes del alimento para modificar la forma en que se da el crecimiento de cristales; estos pueden ser crioprotectores penetrantes los que son de bajo peso molecular como polialcoholes y/o crioprotectores no penetrantes que son componentes poliméricos que tienen alta

capacidad de retención de agua que contribuyen a promover o limitar los daños a la estructura del alimento.

2.2. Hipótesis de Investigación

La mandarina es un fruto no climatérico de temporada por lo que la congelación de gajos de esta representa una alternativa que al emplear crioprotectores nanoestructurados se contribuye al mantenimiento de sus características de calidad si se logra con ello disminuir el tamaño de cristal durante la congelación por convección forzada y su almacenamiento.

2.3. Definición de objetivos

2.3.1. Objetivo General

Evaluar el potencial efecto crioprotector de nanoliposomas con aceite esencial de naranja en la congelación de gajos de mandarina en relación con la velocidad de congelación y temperatura de estabilización, determinando los cambios en sus propiedades físicas, fisicoquímicas y texturales durante su almacenamiento a -18°C .

2.3.2. Objetivos Particulares

1. Analizar el efecto crioprotector de nanoliposomas de aceite esencial de naranja evaluando la influencia de las condiciones de proceso, determinando los cambios de las propiedades físicas, fisicoquímicas y texturales en gajos de mandarina congelada.
2. Determinar el efecto del crioprotector no penetrante de un polisacárido y su eficacia de nanoliposomas que permitan correlacionar los cambios en la pérdida estructural y textural de gajos de mandarina durante la congelación y almacenamiento a -18°C .
3. Analizar el efecto del método de aplicación de nanoliposomas (inyección e inmersión) en gajos de mandarina y su influencia sobre la velocidad de congelación en relación con la estructura superficial y su comportamiento fisicoquímico en congelación.

- Analizar el efecto de los crioprotectores (polisacáridos y nanoliposomas) sobre los cambios de color asociados a la actividad enzimática post descongelación.

2.4. Selección y justificación de variables

Tabla 1. Factores y Niveles de variación de la experimentación.

Variable Independiente	Nivel de variación		N° de repetición	Variable Dependiente	Variable de Respuesta	Técnica o instrumento
Tipo de estabilizante	Cargil Tex-Insta 12604 (2%)	Infiltración por inmersión	3	Color	Pérdida de color / pardeamiento	Colorímetro Konica Minolta CR-300
				Pérdida de peso		Balanza
% de Exudación	Sinéresis producida					
Tipo de infiltración	N Creamer 46 (2%)	Infiltración por inyección		Análisis de Perfil de textura	Dureza	Texturómetro Brookfield (CT3)
				Inulina de Agave 2%	Prueba de punción	Dureza
Tratamiento de Control	Sin nanoliposomas			3		
Temperatura de Congelación	-20°C lenta		3	Cristales superficiales	Tamaño y forma de cristales	Microscopio digital celestron
	-20°C rápida			Tiempo de congelación	Velocidad de congelación	Termopar USB data Logger Software EasyLog USB

En la tabla 1 se muestran los factores y niveles de variación considerados durante la etapa experimental, con la finalidad de conservar la integridad estructural y fisicoquímica de gajos de mandarina a dos velocidades de congelación empleando nanoliposomas con aceite esencial de naranja incorporados en un polímero natural que sean capaces de actuar como sistemas crioprotectores. En la Tabla 2, también se muestran las variables de respuesta que fueron consideradas para evaluar la efectividad de los tratamientos y realizar las comparaciones necesarias. Cabe mencionar que las pruebas fueron realizadas por triplicado.

2.5. Diseño experimental

En la Tabla 2, se muestra el diseño factorial 3^k, con 3 factores, 3 réplicas y un total de 42 corridas, este diseño se empleó para establecer la influencia de los factores sobre las variables de respuesta consideradas en relación con el tratamiento aplicado con los crioprotectores y la variación de velocidad de congelación.

Tabla 2. Diseño Factorial 3k, empleado para analizar el efecto de las variables sobre las características de gajos de mandarina congelados.

Temperatura de congelación (°C)	Infiltración	Estabilizante (2%)	Repetición
Velocidad 1 (-20)	0	0	3
Velocidad 2 (-20)	0	0	3
Velocidad 1 (-20)	Inmersión	Cargil Tex	3
		N Creamer	3
		Inulina	3
	Inyección	Cargil Tex	3
		N Creamer	3
		Inulina	3
Velocidad 2 (-20)	Inmersión	Cargil Tex	3
		N Creamer	3
		Inulina	3
	Inyección	Cargil Tex	3
		N Creamer	3
		Inulina	3

Para analizar los cambios que se manifiestan en los gajos de mandarina durante el almacenamiento en congelación, se realizaron 21 muestras que tuvieron un tiempo de congelación de 2 horas, 21 muestras con un tiempo de congelación de 1 hora y

media, las 42 muestras tuvieron un almacenamiento de 28 días. El análisis estadístico se realizó con el software Minitab v. 18.0.

2.6. Actividades preliminares

2.6.1. Selección y acondicionamiento de materia prima

Mandarina de la variedad clementina fue adquirida en el mercado de Tlalnepantla de Baz centro, Estado de México, la mandarina se seleccionó con base a su tamaño, color de la corteza homogéneo, libre de manchas (cicatrices resultantes del viento o roce de ramitas), podredumbre, daño mecánico o fisiológico visible y firmeza al tacto.

La mandarina se lavo y desinfecto, posterior se peló (quitando la mayor cantidad de pectina, que es la capa blanca que cubre los gajos de mandarina) como se muestra en la Figura 17 y se llevó a cabo una segunda selección, en la cual se midió el largo y ancho de los gajos para que fueran lo más homogéneo posible.



Figura 17. Mandarina recién pelada y lista para obtener los gajos.

2.6.2. Caracterización y acondicionamiento de congelador

El congelador utilizado en la experimentación es el mostrado en la Figura 18. La caracterización del congelador se realizó con la finalidad de establecer la distribución de la temperatura, y determinar el punto más frío dentro del congelador. El equipo utilizado es un congelador horizontal de uso comercial marca FFC0923DW4 de 200 L de capacidad, en la Figura 19 se esquematizan las dimensiones del congelador y en la Tabla 4, se muestran sus especificaciones técnicas.



Figura 18. Congelador estático empleado en la experimentación.

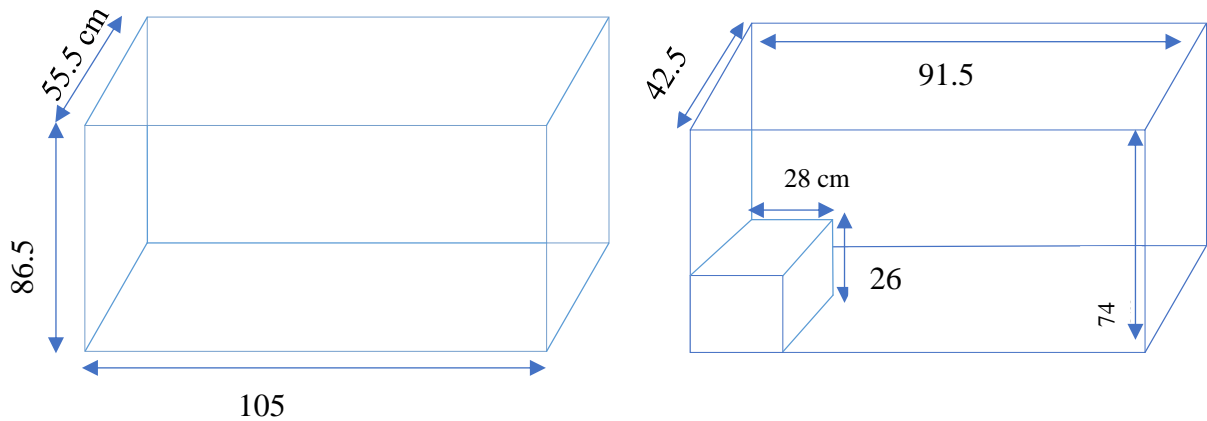


Figura 19. Dimensiones del congelador estático.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la cámara de congelación y almacenamiento.

Características		Cámara de congelación y almacenamiento
Marca		Frigidaire
Modelo		FFC0923DW4
Capacidad		200 L
Medidas externas (cm)	Largo	105
	Ancho	55.5
	Alto	86.5
Medidas internas (cm)	Largo	91.5
	Ancho	42.5
	Alto	74

La Figura 20, esquematiza los puntos en los cuales se llevó a cabo la medición de temperaturas, realizando mediciones de temperatura en cada una de las paredes considerándose 6 puntos para las paredes externas y 3 puntos para las paredes

internas, teniendo un monitoreo de la temperatura cada minuto, dicho monitoreo se realizó empleando un termopar digital (termohigrómetro) marca *Data logger Lascar* modelo EL-USB-TC y un termómetro láser.

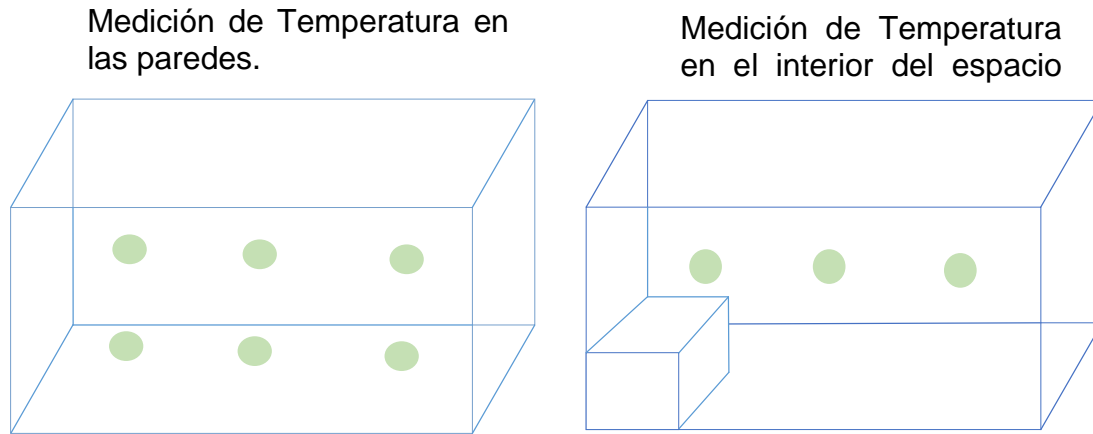


Figura 20. Temperaturas por zonas en la cámara de congelación.

Una vez llevada a cabo la caracterización en función a la distribución de temperaturas se realizaron las adaptaciones necesarias para llevar a cabo la congelación por convección forzada con la finalidad de tener las dos velocidades de congelación y realizar la comparación en relación con el efecto crioprotector de los sistemas. La Figura 21 muestra la forma en que se aisló el congelador y la colocación de un ventilador marca Mytek para generar congelación forzada, además de considerar los puntos más fríos del congelador para llevar a cabo el proceso; se verificó la velocidad del aire y la temperatura del medio, utilizando un anemómetro Testo modelo 405-V1 y un termopar digital (termohigrómetro) *data logger lascar* modelo USB-TC y un termómetro *HANNA Cal Check*, la velocidad de aire obtenida fue de 3.24 m/s.



Figura 21. Acondicionamiento del sistema aislante para la mayor velocidad de congelación.

2.6.3. Elaboración de nanoliposomas

Los nanoliposomas fueron preparados por el método de formación de película empleando lecitina de soya y estos se cargaron con aceite esencial de naranja, la película se obtuvo evaporando el disolvente (cloroformo) durante 24 h y posteriormente los nanoliposomas se prepararon por hidratación de película, el contenido de aceite esencial de naranja en la dispersión fue de 2 g/L, se empleó como estabilizante alcohol polivinílico al 3 g/L.

Con la finalidad de estabilizar los nanoliposomas, estos fueron recubiertos con tres polisacáridos Cargil®Tex-Insta, Ingredion®N-Creamer y Oro®Fructanos de agave, en todos los casos la concentración empleada fue de 20 g/L.

2.6.4. Evaluación de tamaño de partícula e índice de polidispersión de nanoliposomas

El tamaño de partícula e índice de polidispersión de los nanoliposomas se determinaron mediante la técnica de dispersión de luz láser con un ángulo fijo de 90° utilizando el equipo Zetasizer® Nano-ZS90 que es un analizador de tamaño de partícula y tamaño molecular de dos ángulos. Para llevar a cabo la medición es necesario diluir las muestras con agua destilada (2 a 1), todas las mediciones se realizaron por triplicado, obteniéndose la distribución de tamaño de partícula en función a la intensidad.

2.6.5. Determinación de aceite esencial de naranja infiltrado

Para los tratamientos con nanoliposomas con aceite esencial de naranja que se emplearon como estabilizante uno de los polímeros (Cargil®Tex-Insta, Ingredion®N-Creamer y Oro®fructanos de agave) se determinó la cantidad de aceite infiltrado para cada polímero y la eficiencia de encapsulación, centrifugando 2 mL de disolución durante 30 min a 13 000 rpm.

Posteriormente hubo una segunda centrifugación para las disoluciones que contenían Cargil Tex-Insta o N Creamer (waxy), éstas se diluyeron con ethanol, la

segunda centrifugación fue por 30 min a 13 000 rpm. Ambos factores (infiltración y eficiencia de encapsulación) requieren de la separación de las partículas del medio. Se recupero el sobrenadante y se midió la absorbancia en un espectrofotometro Genesy 10S UV-VIS $\lambda = 0.561$ contrastando el resultado con la curva patrón previamente elaborada (ver Figura 22).

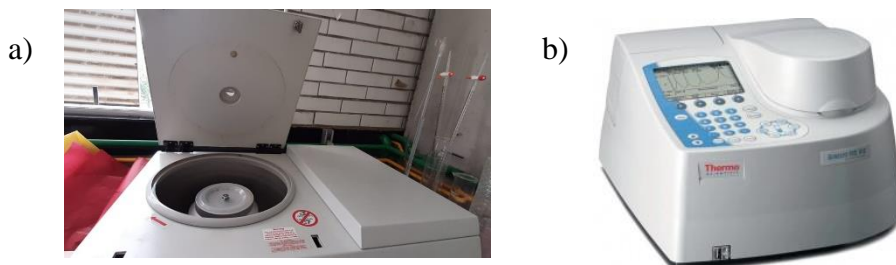


Figura 22. Determinación de aceite esencial de naranja infiltrado:
a) Centrifuga HERMLE Z 323 K y b) Espectrofotómetro Genesy 10 UV-VIS.

2.6.6. Selección de material de envase

El envasado se realizó en bolsas de polietileno de alta densidad de dimensiones de 12.5 cm de alto por 15.5 cm de ancho, una vez colocada la mandarina congelada en su interior, estas se sellaron térmicamente (ver Figura 23).



Figura 23. Envase de polietileno de alta densidad

2.7. Actividades experimentales

2.7.1. Diagrama de proceso

Primera selección: Las mandarinas se seleccionaron con base a su tamaño, color de la corteza (que tuviera un color homogéneo y no contara con decoloraciones),

libre de daño mecánico o fisiológico visible (hematomas o manchas en la superficie de la casacara).

Lavado: Se realizó el lavado para eliminar bacterias superficiales, residuos de insectos y suciedad adherida a la corteza de la mandarina; se lavaron con agua y jabón.

Pelado: Se realizó el pelado de forma manual, eliminando la cascara y pectina que cubre los gajos (no se eliminó por completo la pectina).

Cortado: Una vez pelada la mandarina se cortaron o separaron cada uno de los gajos.

Segunda selección: Una vez separados todos los gajos de mandarina se seleccionaron los que no estuvieran rotos y se midieron para obtener un tamaño más homogéneo, con una longitud de 35.89 mm, ancho de 20.61 mm y profundidad de 12.45 mm a 16.28 mm.

Infiltración: Los gajos seleccionados fueron sumergidos o inyectados (ver Figura 24) en las soluciones (nanoliposomas con aceite esencial de naranja y diferente crioprotector), durante un tiempo de 10 min a una temperatura ambiente (de 22 a 25 °C), posteriormente se escurrieron por un minuto antes de ser ingresados al congelador.



Figura 24. Infiltración de nanoliposomas por inmersión

Congelación: Los gajos de mandarina una vez infiltrados, se llevaron a la cámara de congelación con una temperatura del medio $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante una hora y media. Se obtuvieron las curvas de congelación mediante el registro del cambio de la temperatura en función del tiempo, para dicha medición se empleó un termohigrómetro digital *Data logger* modelo EL-USB.TC, el cual se programó con el software *EasyLog* USB. Antes de iniciar la congelación se penetró el gajo de mandarina con un termopar tipo K, hasta su centro como se muestra en la Figura 25.



Figura 25. Monitoreo de temperatura en el centro del gajo de mandarina.

Envasado: Posterior a la congelación de los gajos de mandarina, se pesaron de 35 g a 40 g de muestra (dependiendo del peso de cada gajo), envasándose en bolsas de polietileno de alta densidad con capacidad para 50 g de muestra (ver Figura 26), posteriormente se realizó un sellado térmico.

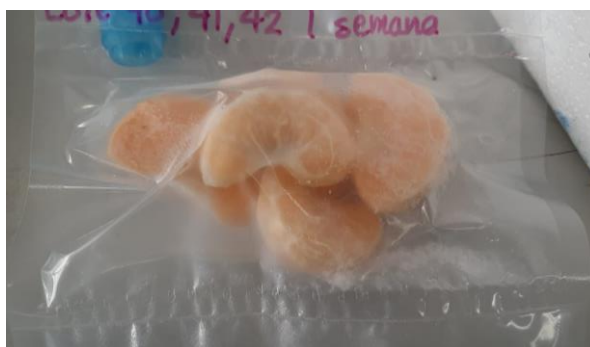
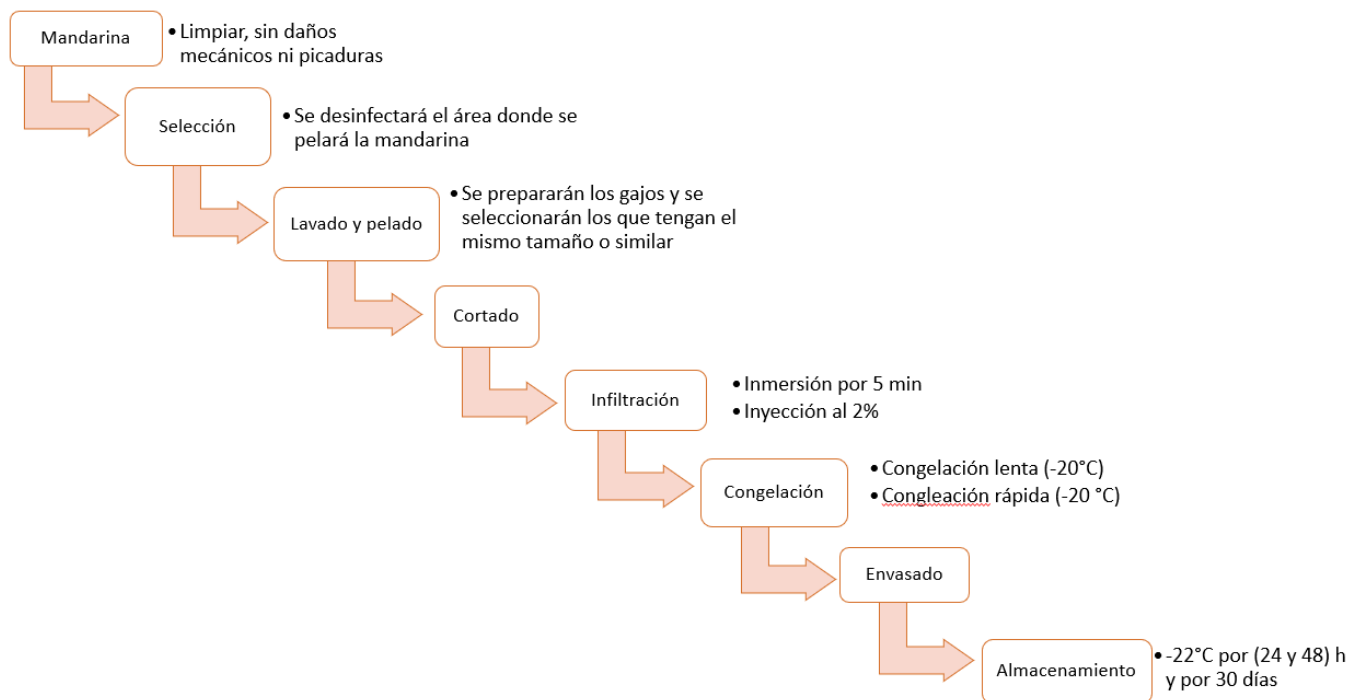


Figura 26. Gajos de mandarina envasada y listas para monitoreo de almacenamiento.

Almacenamiento: Después de que el producto fue envasado, se regresaron a la cámara de congelación (se utilizó como cámara de almacenamiento). El tiempo de almacenamiento fue de 1, 2, 7, 14, 21 y 28 días para ambas congelaciones (por convección natural y convección forzada).

Figura 27. Etapas de proceso seguidas en la congelación de gajos de mandarina.



2.7.2. Determinación de curvas de congelación

Las curvas de congelación se obtuvieron mediante el registro de historias térmicas de cada muestra congelada (por cada tratamiento y por las dos velocidades de congelación), utilizando un termohigrómetro *Data Logger* modelo EL USB. TC, este fue programado con el software EasyLog USB.

Las mediciones de temperatura se llevaron a cabo dentro del congelador. El monitoreo de temperaturas inició una vez que los gajos de mandarina ya contaban con el tratamiento (nanoliposomas con aceite esencial de naranja y un agente crioprotector), se colocó un termopar tipo K en el centro del gajo de mandarina (ver Figura 23), los gajos de mandarinas utilizados fueron los más homogéneamente

posible. Las tomas de temperatura se realizaron en diferentes posiciones dentro del congelador.

Los datos obtenidos se graficaron con el programa *Datta Logger* USB y mediante un análisis de las curvas graficadas se determinó el tiempo en el que tardo en alcanzar la temperatura de congelación de -20 °C para el centro térmico del gajo de mandarina.

2.7.3. Determinación de tiempo y velocidad de congelación

Para la determinación del tiempo de congelación se colocó un termopar tipo K en el centro geométrico de un gajo de mandarina como se muestra en la Figura 25, se considera dicho punto como el centro térmico, empezando desde la temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura de -20 °C.

Se determinó la velocidad de congelación (C/min) obteniendo los tiempos de congelación desde el PIC (Punto Inicial de Congelación) del gajo de mandarina (-1.4 °C) hasta -20 °C, posteriormente fueron calculadas las velocidades de congelación con la siguiente ecuación (1), dada por el Insitituto Internacional del Frío:

$$V_{Congelación} = \frac{PIC - T_f}{t_c} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

PIC = temperatura del punto inicial de congelación

Tf = temperatura final del producto congelado

tc = tiempo transcurrido entre el inicio y el final del proceso de congelación (Olivera, 2009).

2.7.4. Determinación de color

Los cambios de color en las muestras con diferentes tratamientos y tiempo de almacenamiento se determinaron con un colorímetro Konica Minolta®CM 600d; el equipo fue calibrado empleando una placa blanca como referencia antes de realizar cada medición, el software del equipo proporciona las coordenadas de L*, a* y b*; donde L*, es la luminosidad; a*, el color rojo (valores positivos) o verde (valores

negativos) y b^* , el color amarillo (valores positivos) o azul (valores negativos). Con dichas coordenadas se obtuvo el ángulo de tonalidad ($^{\circ}\text{Hue}$) y la cromaticidad (croma), los cuales fueron determinados mediante las siguientes ecuaciones (Hurtado, 2014).

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$H^{\circ} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{Ecuación (3)}$$



Figura 28. Colorímetro Konica Minolta CM-600d

2.7.5. Determinación de dureza

Para medir los cambios de dureza de las muestras, se realizó mediante pruebas de punción, utilizando el Texturómetro *Brookfield* modelo CT-3 con celda de carga de 25 000 g y con una sonda de TA41, con elementos base TA-BT-KI, la prueba se realizó con un valor meta de penetración de 6.0 mm con una carga de activación de 0.07 N y una velocidad de 3 mm/s. Los resultados obtenidos fueron de dureza expresados en Newton.



Figura 29. Texturómetro Brookfield CT3

2.7.6. Determinación de microscopía digital (tamaño de cristal de hielo)

Se realizó un análisis de imagen por microscopía mediante un microscopio digital marca *Celestron* 44302, con una resolución de 2 megapíxeles y un aumento de 10x a 150x. Se procuró captar todo el gajo de mandarina congelada y se analizaron los cristales de hielo formados en la superficie de cada gajo.



Figura 30. Microscopio digital Celestron 44302

2.7.7. Determinación de pérdida de peso

Se evaluó la pérdida de peso registrando el peso inicial de los gajos de mandarina al inicio del almacenamiento en congelación y el peso final (momento en el que se hace el muestreo). El peso fue determinado a través de una balanza analítica marca ScoutPro, el porcentaje de pérdida de peso (± 0.01 g) se determinó mediante la siguiente ecuación propuesta por (Zambrano-Zaragoza, 2013):

$$\% \text{ pérdida de peso} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación (4)}$$

2.7.8. Determinación de porcentaje de exudación

El porcentaje de exudación de los gajos de mandarina después de haber sido sometidos a un proceso de congelación y posterior su descongelación, se realizó utilizando papel filtro, se pesó el peso inicial y final del papel filtro, de igual forma se pesó el peso inicial del gajo congelado y el peso final del gajo descongelado, posteriormente se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ exudación} = \left(\frac{m_{kc} - m_{kd}}{m_{kc}} \right) * 100 \quad \text{Ecuación (5)}$$

CAPÍTULO III. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultados de actividades preliminares

3.1.1. Acondicionamiento de congelador

En la Tabla 4 se muestra el promedio de las temperaturas en las paredes exteriores del congelador, esquematizando este comportamiento en la Figura 31, estableciéndose que la zona más fría se encuentra en la parte superior del equipo, por lo tanto, esta parte fue la que se aprovechó para tener un control de las condiciones de congelación del alimento con los dos tipos de congelación (por convección natural y aire forzado).

Para la congelación por convección forzada, el ventilador fue colocado de tal forma que el aire chocará con la pared más fría del congelador, se midió la velocidad del aire, la cual alcanzó 3.24 m/s con una temperatura en el medio de -20 °C.

Tabla 4. Distribución de temperaturas en las diferentes zonas de la cámara de congelación.

Punto/Pared trasera	1	2	3	4	5	6
Promedio	-24.21	-24.44	-24.58	-26.40	-25.12	-24.98
Desviación	7.26	7.77	8.18	8.78	8.92	9.11
C.V.	0.28	0.35	0.31	0.31	0.33	0.34
Pared delantera	1	2	3	4	5	6
Promedio	-26.36	-26.10	-27.26	-26.99	-26.46	-25.14
Desviación	4.19	3.54	4.53	4.20	3.70	3.39
C.V.	0.16	0.14	0.17	0.16	0.14	0.13

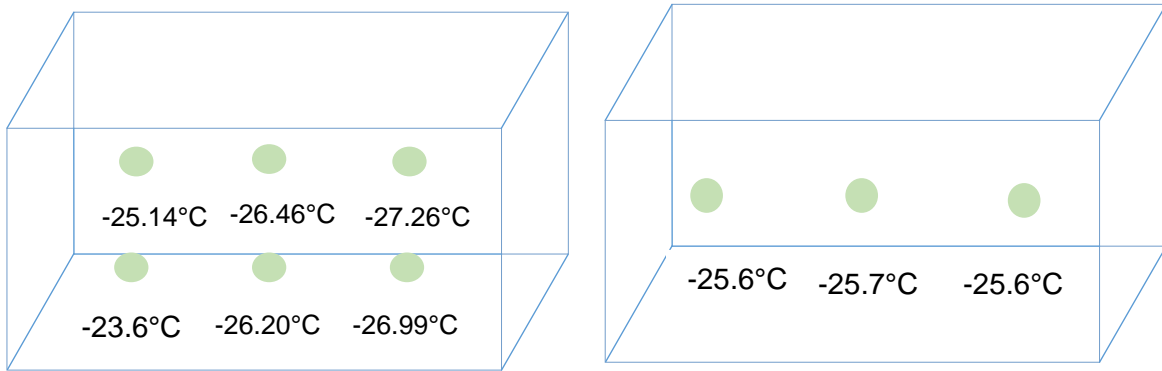


Figura 31. Distribución de temperatura en la cámara de congelación.

En la Figura 32 donde se muestran las historias térmicas obtenidas de las pruebas preliminares durante la caracterización del congelador, para convección natural y forzada con las que se obtuvieron las dos velocidades de congelación estudiadas, estas curvas están en función del tiempo.

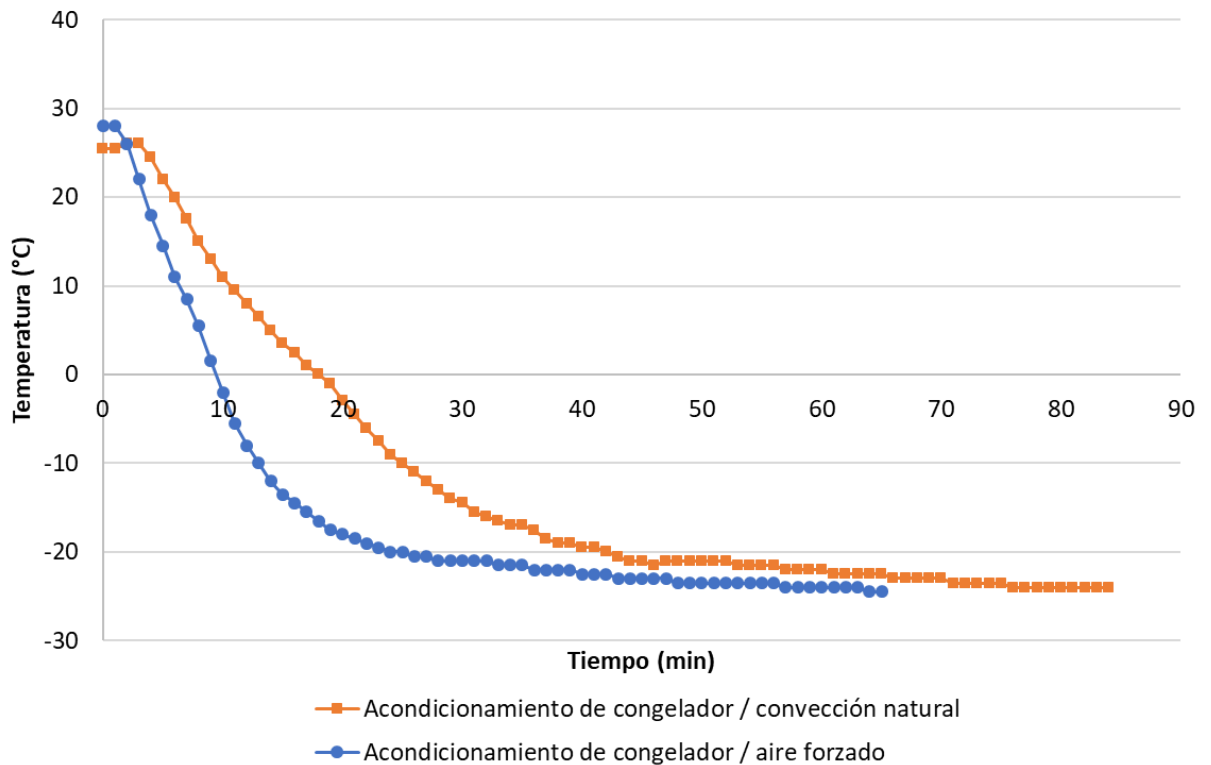


Figura 32. Historias térmicas de caracterización de congelador por convección natural y aire forzado.

A. Tiempos de congelación teóricos y experimentales

Las pruebas preliminares de la congelación de los gajos de mandarina sin ser envasado por convección natural y convección forzada (aire forzado), demostraron que efectivamente teniendo un medio con aire forzado reduce el tiempo de congelación pues alcanzaron la temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre 90 y 120 min.

En la Tabla 5, se presenta un resumen de las condiciones del proceso de congelación, el tiempo de congelación experimental y el tiempo de congelación teórico calculado a partir de la ecuación de Nagaoka (Ver anexo A).

En la Tabla 5 se observa que existe diferencias entre el tiempo de congelación teórico y el tiempo de congelación experimental, tanto para una congelación por convección natural como utilizando convección forzada (aire forzado); para una congelación por convección natural se tuvo una diferencia de 1.97 h entre el tiempo calculado teóricamente y el obtenido experimentalmente, en cambio para una congelación utilizando aire forzado el tiempo de congelación tanto teórico como experimental fue más preciso (ver Tabla 5), este resultado se debió al fenómeno de transferencia de calor por convección forzada; el intercambio de energía entre la superficie del gajo de mandarina y el flujo de aire es mayor, cuando la convección es natural existe una diferencia de densidades entre el medio y el producto, que resulta del gradiente de temperaturas en el aire al entrar en contacto con el producto a su temperatura inicial (Darmawan, 2019).

La predicción de los tiempos de congelación se ve afectada, además de las variables analizadas en este estudio, por la geometría del alimento, su composición, la presión del sistema; el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor influye especialmente en los casos con velocidad de operación baja (Sebastián et. al., 2019). Las predicciones obtenidas usando la ecuación de Nagaoka (ver anexo C) demostró que se encuentra dentro de los estándares utilizados en ingeniería de acuerdo con (Reno *et al.*, 2011), lo que indica que puede ser aplicable en situaciones comerciales. También las predicciones obtenidas de los tiempos de congelación, debe considerarse el gasto energético que involucra retirar el calor sensible del producto.

Tabla 5. Condiciones y constantes de congelación de gajos de mandarina.

	Congelación por convección natural	Congelación por aire forzado
Dimensiones del gajo	35.89 x 20.61 mm	35.89 x 20.61 mm
Espesor	12.06 mm	12.06 mm
Temperatura inicial del producto	24 °C	22 °C
Temperatura del medio	-26 °C	- 19.5°C
Punto inicial de congelación	-1.4 °C	-1.4 °C
Temperatura final de congelación	-20 °C	-20 °C
Coefficiente convectivo	5 W/m ² °C	22 W/m ² °C
Velocidad del aire	-----	3.24 m/s
Tiempo teórico	4.97 h	1.34h
Tiempo experimental	3h	1.30 h
Velocidad de congelación	6.2 °C/h	9.3 °C/h

Se empleó una malla de metal como base para la congelación de los gajos de mandarina, con el fin de evitar el contacto con las paredes del congelador y así, predominará únicamente un mecanismo de transferencia, convección natural y una convección forzada de aire.

La estimación del tiempo de congelación utilizando la ecuación de Nagaoka fue razonablemente precisa teniendo una congelación por convección natural, indicando entre el tiempo teórico y el tiempo experimental, porque los errores aceptables en términos de ingeniería (aproximadamente 10 % o menos) como se ha establecido para fruta, quesos, carne (fresca y cocida) y geles (Jimenez *et al.*, 2013).

B. Velocidad de congelación

La velocidad de congelación que influye en el tiempo de congelación y la calidad del producto puede ser definido como la diferencia entre las temperaturas iniciales y finales del producto dividido por el tiempo de congelación (°C/h).

Para observar mejor el comportamiento de la velocidad de congelación ver Figura 32 en la página 48.

3.1.2. Tamaño de partícula e índice de polidispersidad de nanoliposomas

El tamaño de partícula e índice de polidispersidad son parámetros físicos importantes que determinan la estabilidad, biodisponibilidad y homogeneidad de un sistema bioactivo dentro de un sistema nanoportador (Włodarczyk *et al.*, 2017). El tamaño medio de partícula de los nanoliposomas varió de 163.7 a 203 nm (Ver Tabla 6). En investigaciones similares, se informó un aumento en el tamaño de partícula de los nanoliposomas después de agregarle otro tipo de estabilizante (polisacárido) o hidrolizado (Mazloomi *et al.*, 2020). El tamaño de nanoliposoma está relacionado con varios factores como la velocidad de agitación utilizada en el proceso de encapsulación, composición, concentración y tipo de polímero presente en la formulación (da Rosa Zavareze *et al.*, 2014).

El índice de polidispersidad (PDI) se encontró que las formulaciones de nanoliposomas eran de 0.211 a 0.391, siendo de alguna manera un sistema monodisperso y uniforme (Sarabandi *et al.*, 2019). El valor del índice de polidispersidad encontrado fue de 0.213 a 0.444 (Ver Tabla 6), que indica la presencia de poblaciones de partículas monodispersas o un rango de tamaño estrecho, indicando también la homogeneidad en la distribución del tamaño de partícula. El índice de polidispersidad se encuentra dentro del rango encontrado por (da Rosa Zavareze *et al.*, 2014) y (Sarabandi *et al.*, 2019) para nanoliposomas.

Tabla 6. Tamaño de Partícula e índice de polidispersidad de nanoliposomas con aceite esencial de naranja.

	<i>Tamaño de Partícula (nm)</i>	<i>Índice de Polidispersidad</i>
<i>Cargil-Tex Insta</i>	203.5	0.213
<i>Waxy</i>	196	0.444
<i>Inulina</i>	163.7	0.27

3.2. Curvas de congelación

En la Figura 33 se muestran las curvas de congelación correspondientes al proceso de congelación, con diferentes tratamientos (utilización de agente crioprotector y forma de infiltración).

La disminución de la temperatura, ocasiona la reducción de la actividad enzimática y de las reacciones oxidativas, debido a la formación de cristales de hielo que modifican la disponibilidad del agua y evitan que se favorezcan las reacciones de deterioro (Cer *et al.*, 2007). El empleo de la congelación generalmente resulta en el incremento en la calidad; dicha calidad se ve influenciada por el proceso de congelación, son factores importantes que determinan la calidad final.

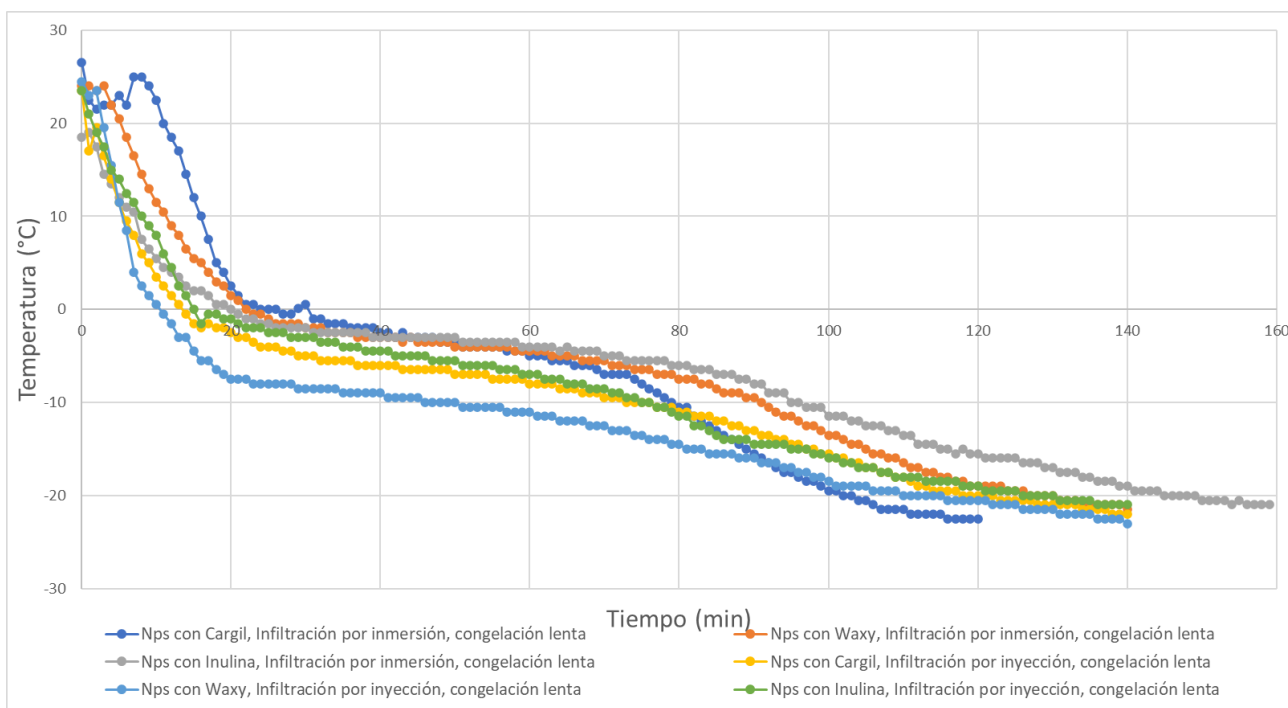


Figura 33. Curvas de congelación con diferentes tratamientos (agente crioprotector y tipo de infiltración) en gajos de mandarina, por congelación por convección natural.

Lo anterior se ve reflejado en la Figura 33, en la que se muestran las curvas de congelación; apreciándose que para el tipo de infiltración existe una mayor velocidad de congelación, que corresponde para la infiltración del tratamiento por inyección con respecto a los que tuvieron una infiltración del tratamiento por inmersión, lo que implica que el crecimiento de los cristales de hielo sea menor.

En la Figura 34 se muestran las curvas de congelación que corresponden al proceso de congelación por convección de aire forzado, con diferentes tratamientos y método de infiltración (inmersión e inyección); se ve reflejado que para el tratamiento de nanoliposomas con agente crioprotector N Creamer (Waxy) con método de infiltración por inyección, existiendo una mayor velocidad de congelación, lo que implica que el crecimiento de los cristales de hielo es menor, también es en el que mejor se observa el grado de subenfriamiento; donde la temperatura disminuye antes de la congelación por la eliminación del calor sensible. Todo lo anterior tomado como referencia los gajos de mandarina congelados sin ningún tratamiento (Ver Figura 34 parte superior).

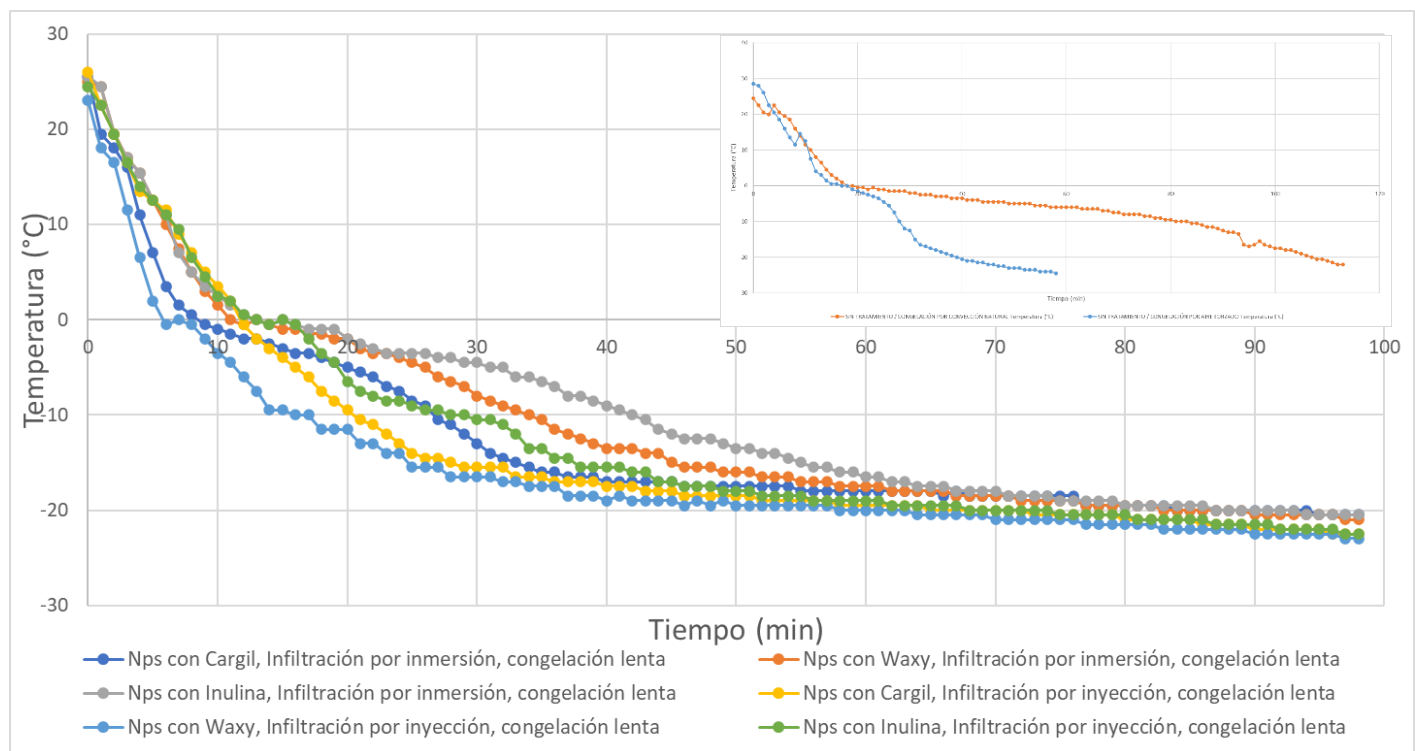


Figura 34. Curvas de congelación con diferentes tratamientos (agente crioprotector y tipo de infiltración) en gajos de mandarina, por congelación por aire forzado.

3.3. Análisis de tamaño de cristal de hielo

Las características del cristal de hielo pueden tener un impacto directo en la microestructura del producto, proporcionando daños irreversibles a las células y tejidos, resultando en pérdidas de calidad (Mulot *et. al.*, 2019). La congelación tiende

a alterar la estructura y destruir la turgencia de las células vivas en los tejidos (Gómez *et. al.*, 2007).

El número y tamaño de los cristales de hielo, junto con su velocidad de crecimiento durante la congelación, causan un mayor o menor deterioro irreversible en la estructura de los tejidos, dependiendo de las características de la misma (Canet, 2017); el tamaño del cristal de hielo es afectado por la velocidad de congelación. Durante el almacenamiento congelado, los cristales de hielo pueden sufrir cambios en el tamaño, número y distribución por un proceso llamado recristalización de hielo (Vicent *et. al.*, 2020).

En la Tabla 7 se muestran las micrografías correspondientes a los tratamientos para aquellos gajos de mandarina, sometidos a congelación por convección natural, considerando el método de infiltración del agente crioprotector.

En la Tabla 8 se puede observar el comportamiento de los gajos de mandarina cuando se llevó a cabo la congelación por convección con aire forzado. Las velocidades de congelación conducen al desarrollo de una estructura del cristal de hielo y los cambios son desde la parte inferior hasta la parte superior de los gajos de mandarina que se pueden ver en las Tablas 7 y 8 para una congelación por convección natural y aire forzado.

El crecimiento de pequeños cristales de hielo y cristales grandes ocurre en mayor medida durante las fluctuaciones de temperatura durante el almacenamiento. En las tablas también se comparó claramente que los cristales de hielo cambio del interior del alimento a su parte superior y, por lo tanto, creó la distribución del tamaño de los cristales de hielo que se tienen en las muestras; las distribuciones de tamaño oscilan entre 0.06 a 0.15 mm.

Estos resultados concuerdan con estudios previos que investigaron el crecimiento del cristal de hielo durante la congelación y almacenamiento (M.Z-Malaysia *et al.*, 2010), investigando la evolución de la distribución del tamaño de los cristales de hielo en la fresa.

Tabla 7. Micrografías de gajos de mandarina durante el almacenamiento en función a la velocidad de congelación empleando convección natural.















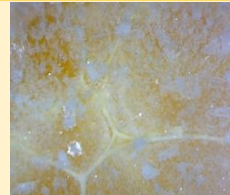






















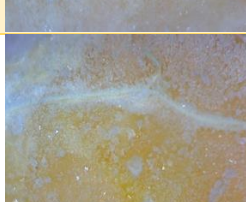




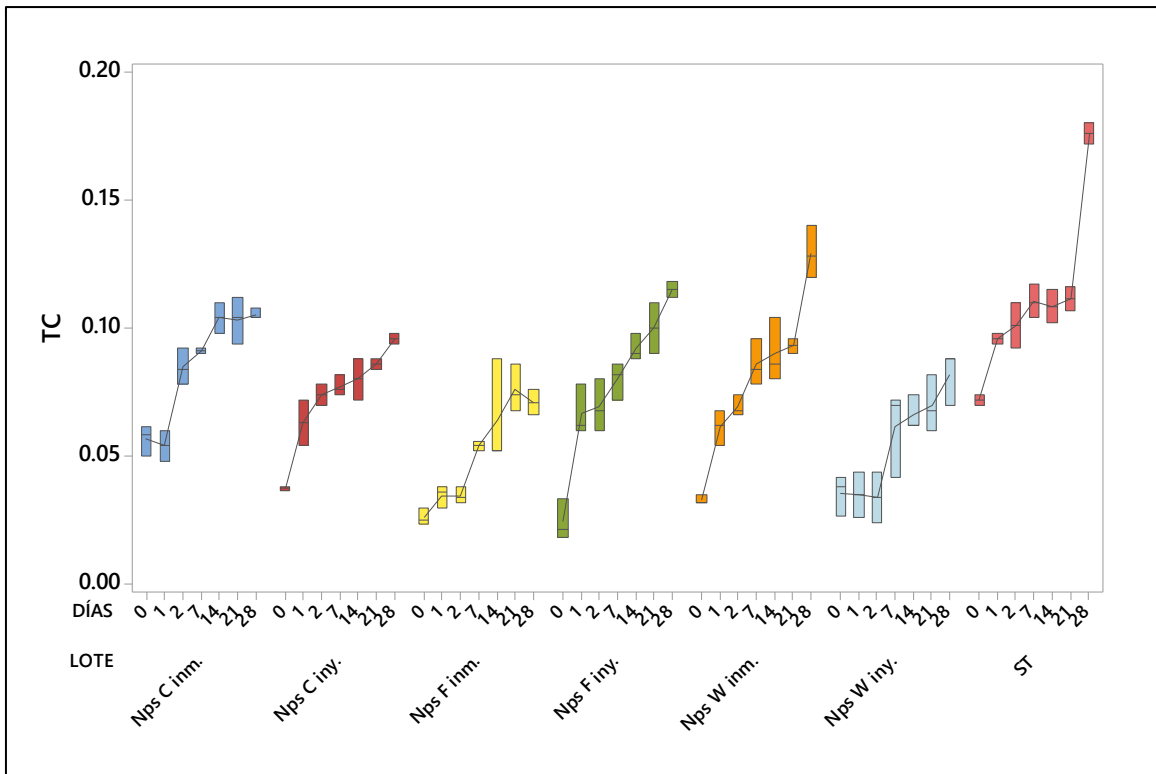
	DÍA 0	DÍA 14	DÍA 28
Control			
Nanoliposomas-Cargil®Tex/inmersión			
Nanoliposomas-N Creamer®/inmersión			
Nps. Inulina, infiltración por inmersión, cong. lenta			
Nps. Cargil, infiltración por inyección, cong. lenta			
Nps. Waxy, infiltración por inyección, cong. lenta			
Nps. Inulina, infiltración por inyección, cong. lenta			

Tabla 8. Micrografías de gajos de mandarina durante el almacenamiento en función de la velocidad de congelación empleando aire forzado.

	DÍA 0	DÍA 14	DÍA 28
Sin Tratamiento, congelación rápida			
Nps. Cargil, infiltración por inmersión, cong. rápida			
Nps. Waxy, infiltración por inmersión, cong. rápida			
Nps. Inulina, infiltración por inmersión, cong. rápida			
Nps. Cargil, infiltración por inyección, cong. rápida			
Nps. Waxy, infiltración por inyección, cong. rápida			
Nps. Inulina, infiltración por inyección, cong. rápida			



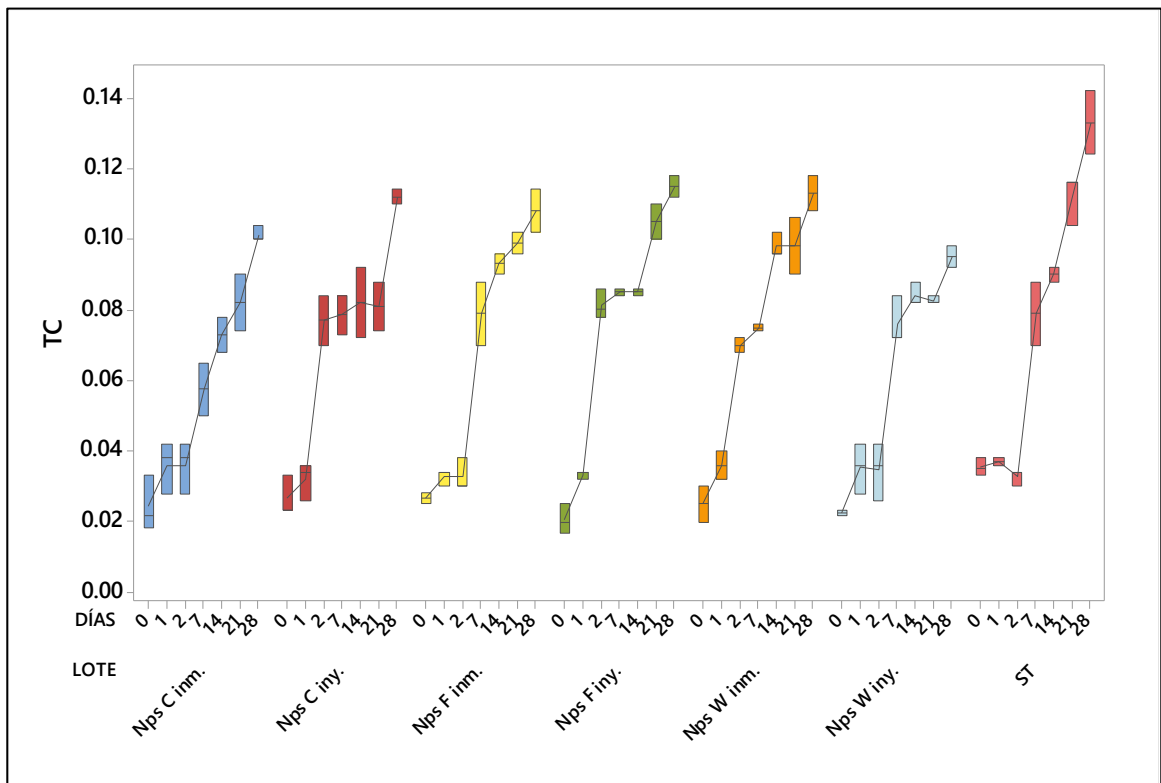
Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 35. Tamaño de Cristal de hielo por el método de congelación por convección natural, empleando diferentes tratamientos de agente crioprotector.

La Figura 35 por otro lado, se observa que el tamaño de cristal obtenido cuando se empleó el método de congelación por convección natural los gajos sin ningún tratamiento mostró el mayor tamaño de cristal inicial con 0.06 mm, el que continuo su crecimiento con el tiempo de almacenamiento, estabilizándose durante 21 días a tamaños de entre 0.10 – 0.12 mm, resaltándose que los gajos con nanoliposomas con Cargil por inmersión (Nps C inm) e inyección (Nps C iny), nanoliposomas con

Fructanos por inmersión (Nps F inm) y nanoliposomas con N Creamer por inyección (Nps W iny) no mostraron diferencias estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) respecto al tamaño de cristal mostrando un tamaño promedio de 0.10 mm durante el periodo de almacenamiento, siendo los más estables aquellos que contienen N Creamer y que fueron aplicados por inyección (Nps W iny).



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 36. Tamaño de Cristal de hielo por el método de congelación por aire forzado, empelando diferentes tratamientos de agente crioprotector.

También se puede observar que el método de congelación influye para el tamaño del cristal de hielo, siendo para las muestras que no tuvieron ningún tratamiento y no tuvieron almacenamiento, un tamaño de cristal más pequeño y homogéneo; el método de congelación por aire forzado se obtuvo un tamaño de cristal de 0.01 y 0.02 mm respectivamente, el tamaño de cristal para las frutas congeladas por aire forzado es menor de 0.03 mm como lo indica (Smith, 1885).

3.4. Pérdida de peso

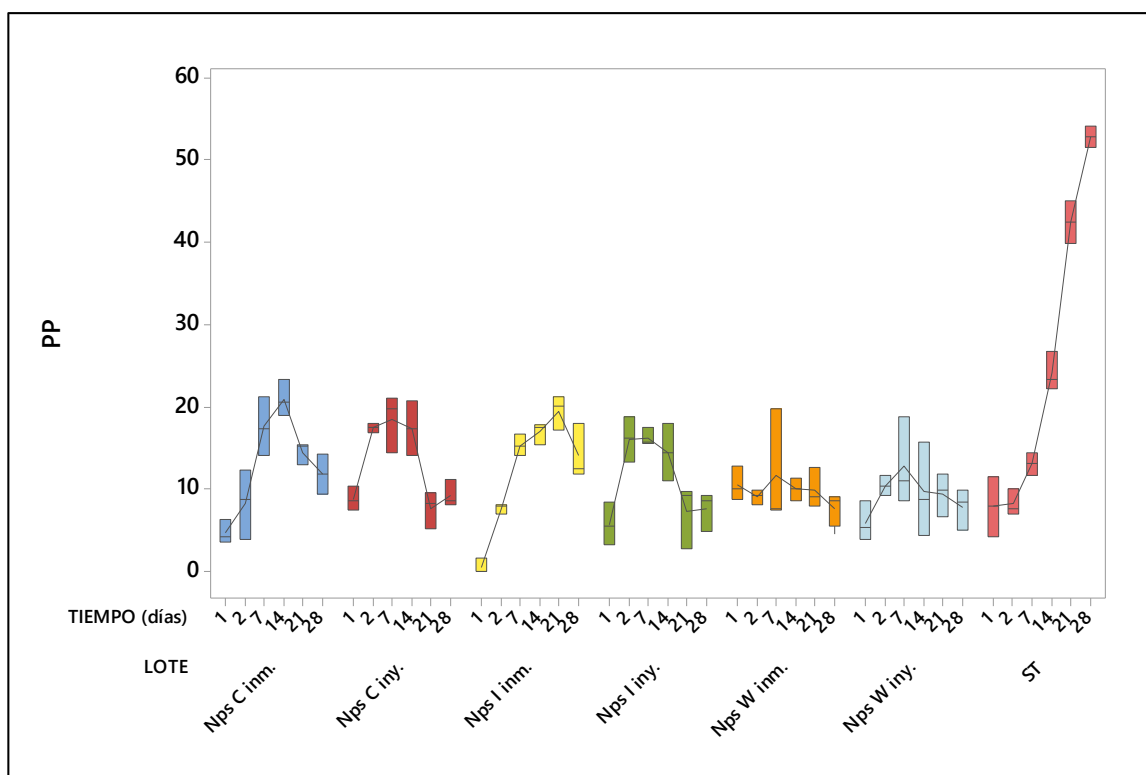
En el almacenamiento prolongado de los frutos en cámaras de congelación puede producirse sublimación, pérdidas de peso considerables que, prescindiendo de la pérdida de sustancia. La deshidratación o la pérdida de peso se considera como un parámetro de calidad importante para frutos congelados sin embalaje (Barbosa *et. al*, 2005).

Los alimentos pierden humedad durante el proceso de congelación, porque la superficie es expuesta, existiendo un gradiente de humedad dentro del medio ambiente.

En la Figura 37 se muestra la pérdida de peso para los gajos de mandarina congeladas por convección natural, observándose que la mayor pérdida fue para los gajos sin tratamiento (ST), asociada a pérdidas por deshidratación debido a las rupturas de las estructuras celulares con respecto al tamaño de cristal formado durante el proceso y almacenamiento, sin embargo, es posible también resaltar que los gajos de mandarina con nanoliposomas empleando N-Creamer (Waxy) como polímero crioprotector fueron las más estables durante el periodo de almacenamiento.

En la Figura 38, por otro lado se observa el comportamiento de los gajos de mandarina sometidos a congelación por aire forzado y almacenadas en congelación durante 28 días, mostrándose que inicialmente los gajos control (ST) mostraron pérdidas de peso superiores al 8% desde el momento de la estabilización de las muestras, atribuido a la ruptura celular ya que bajo las condiciones en las que se realizó el proceso de congelación la velocidad de arrastre de humedad fue mayor al

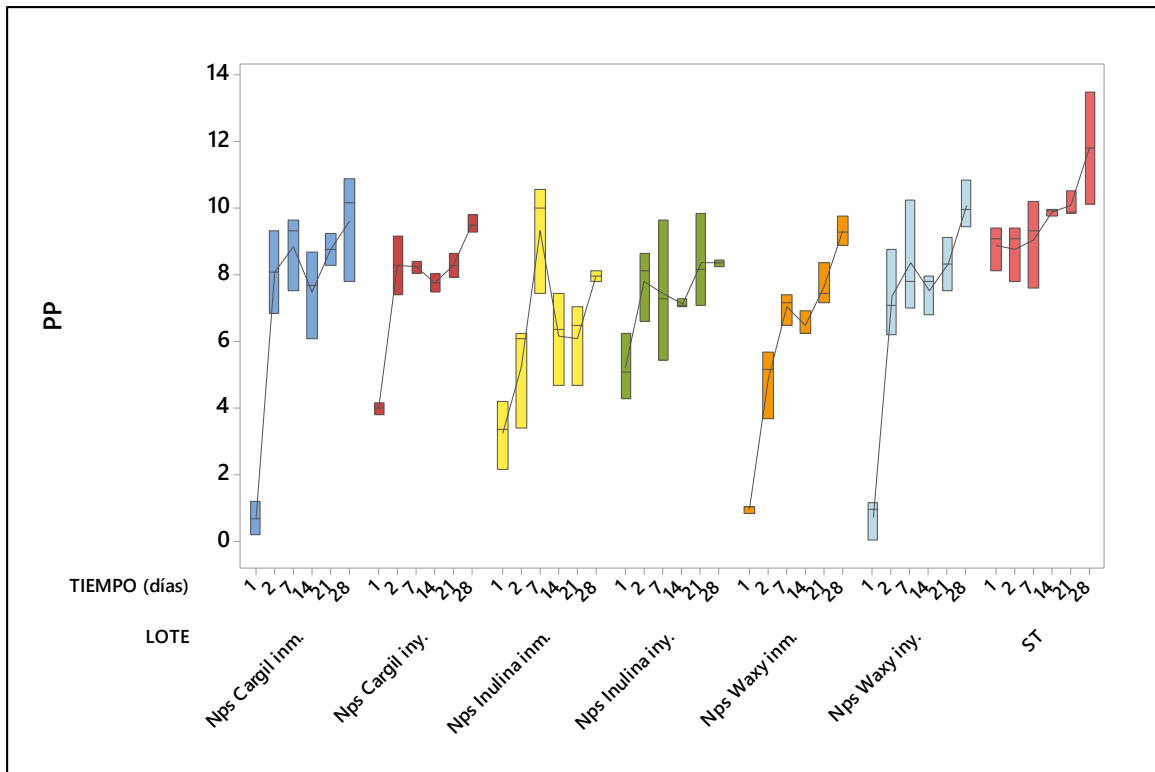
emplear aire forzado con respecto a aquellas en las que se empleó convección natural, así mismo es posible resaltar que los gajos con nanoliposomas que emplearon almidón N Creamer (Waxy) fueron las que tuvieron menores pérdidas iniciales, sin embargo el empleo de fructanos de agave (inulina) contribuyó a tener muestras más estables en cuanto a la pérdida de peso durante el almacenamiento con pérdidas menores al 10%.



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 37. Porcentaje de Pérdida de peso en gajos de mandarina congelados por convección natural.



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 38. Porcentaje de Pérdida de peso para gajos de mandarina congelados por aire forzado.

En relación al porcentaje de pérdida de peso, se determinó que existen diferencias significativas en la utilización de diferentes tratamientos (agente crioprotector y forma de infiltración), y diferentes métodos de congelación (por convección natural y aire forzado).

Debido a que los frutos tienen membranas semipermeables, los sólidos presentes en los nanoliposomas migran hacia el interior de los gajos de mandarina, haciendo

que no haya migración del agua interna, lo que provoca un aumento en el peso, que a mayor tiempo de almacenamiento hay una disminución en la pérdida de peso para los gajos que fueron tratados con los nanoliposomas y los diferentes agentes crioprotector. Se observa que para las muestras que no tuvieron ningún tratamiento la pérdida de peso fue mucho mayor para los 28 días de almacenamiento.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado para ambos métodos de congelación y lo observado en las Figuras 37 y 38, no existió diferencia significativa ($\alpha = 0.05$), sin embargo, es importante destacar que el mayor porcentaje de pérdida de peso se presentó en las muestras que fueron congeladas por convección natural, de acuerdo con (Campañone *et al.*, 2005), esto es debido a que se origina una sublimación de hielo en la superficie debido a diferencias en la actividad de agua entre la superficie del gajo de mandarina y el aire del medio; la temperatura y velocidad del aire influye en el tiempo de congelación y en la pérdida de peso, cuanto mayor sea el tiempo y mayor la velocidad de congelación, menor es la pérdida de peso.

3.5. Porcentaje de exudación

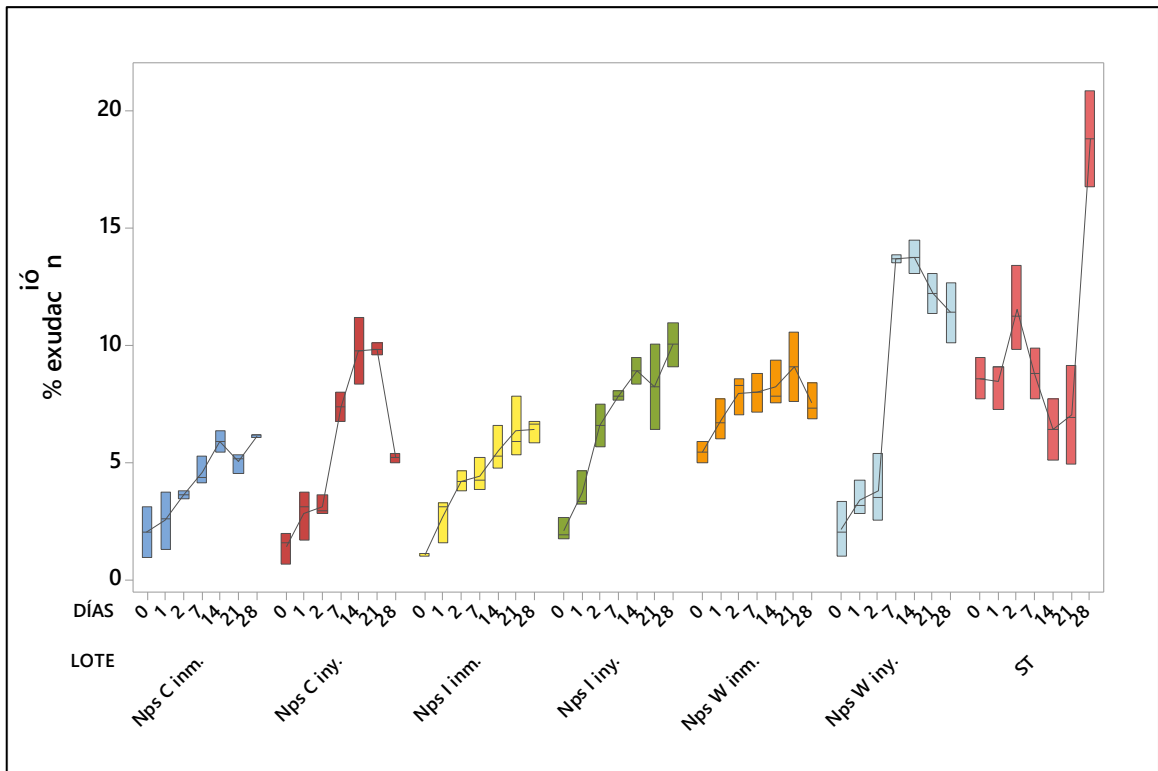
Un aspecto muy importante desde el punto de vista de la conservación de la calidad de los alimentos congelados. Durante el almacenamiento congelado, la recrystalización de cristales de hielo puede causar pérdida de turgencia celular después de una fuga de contenido celular y pérdida de la capacidad de retención de agua de la celda, lo que resulta en la pérdida por goteo de descongelación (Gonalves *et al.*, 2011).

Por lo tanto, la cantidad de pérdida por goteo es un indicador del efecto de reversibilidad del proceso congelado en el tejido.

La mandarina por su estructura interna tiene rupturas del tejido de la pulpa, por tanto, tiende a tener más pérdida de jugo por exudación, haciendo la fruta más blanda, siendo el índice más importante en la calidad del fruto, ya que el

componente principal del jugo es agua que no vuelve a ser absorbida, la cual contiene nutrientes y cuya pérdida implica en una alteración en su textura.

Este fenómeno se vio reflejado en la aparición de un exudado después de descongelar los gajos de mandarina, debido a que las células presentan una cierta dificultad para reabsorber el líquido drenado que fue difundido hacia el exterior.



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 39. Porcentaje de exudación en función al tratamiento crioprotector empleado, congelado por convección natural.

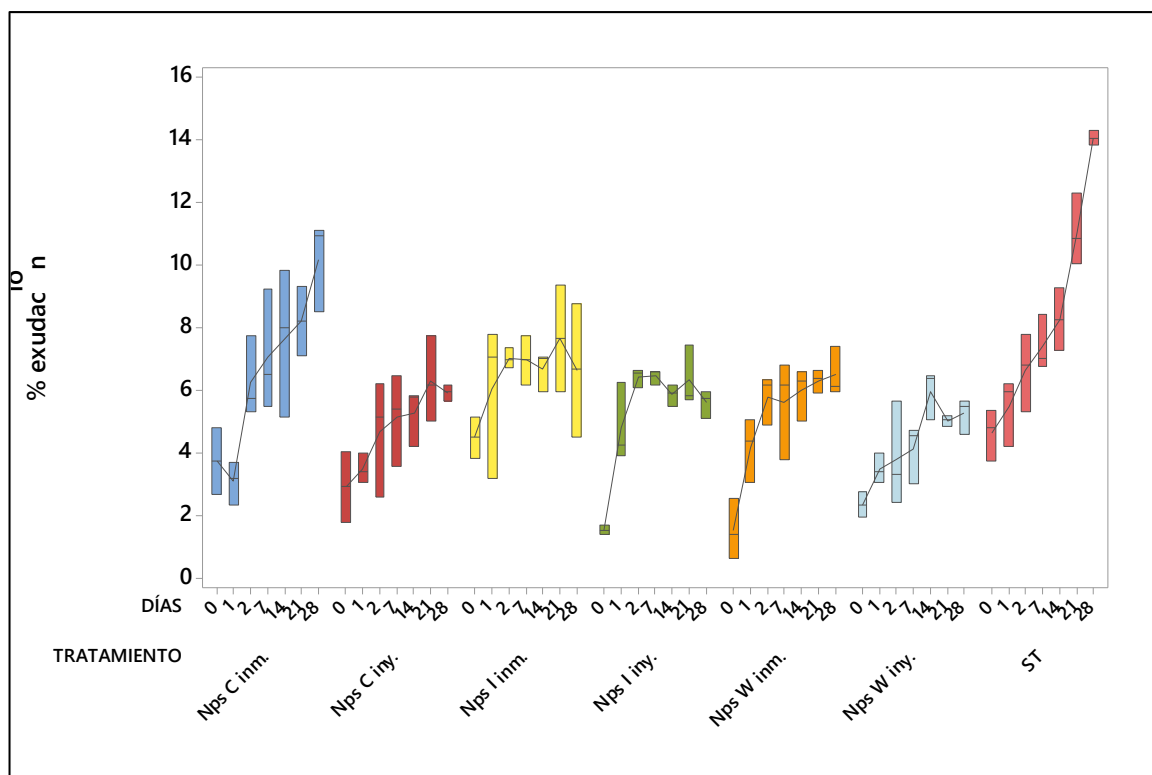
En la Figura 39, se muestra el porcentaje de exudación para los gajos de mandarina, después de la descongelación en función al tratamiento y tiempo de almacenamiento en congelación, cuando el proceso inicial, se llevó a cabo empleando una congelación por convección natural, observándose que, los gajos sin tratamiento (ST) y las tratadas con nanoliposomas y N-Creamer por inyección (Nps, W. Iny.) fueron las que mostraron mayor pérdida por exudación con valores superiores al 15%, en el caso de las Nps. W. Iny., se atribuye a que el líquido inyectado a los gajos de mandarina no fue adsorbido por las vesículas de la mandarina y fue expulsado al momento de la descongelación.

La adición de un agente crioprotector en conjunto con los nanoliposomas con aceite esencial de naranja en conjunto con el agente crioprotector Cargil® Tex-Insta y una infiltración por inmersión (Nps, C, inm), tuvo un efecto favorable en la disminución del grado de exudación de los gajos de mandarina, teniendo un porcentaje de exudación del 0.6 al 6.08%, esto indica que los nanoliposomas no provocaron pérdidas de peso por drenado de líquido, además es posible resaltar que los tratamientos de nanoliposomas con fructanos (inulina) por inmersión (Nps, I, inm) no mostraron diferencia estadísticamente significativa en relación a la pérdida por exudación durante el periodo de almacenamiento con 5.87 % de pérdidas por exudación.

También resaltando que en todos los casos a la inmersión en dispersión de nanoliposomas con diferentes polímeros dieron como resultado menores pérdidas por exudación siendo menores al 8 %.

En la Figura 40, se muestra el porcentaje exudado por los gajos de mandarina cuando se empleó congelación con aire forzado, mostrándose que los gajos de mandarina sin tratamiento fueron las que mostraron mayor pérdida por exudación (ST), la que se incrementó de acuerdo con una cinética de orden cero y alcanzando una pérdida al final del almacenamiento del 13.81 %, mientras que en este caso el comportamiento de las muestras infiltradas por inyección e inmersión no mostraron diferencia estadísticamente significativa, independientemente del polímero utilizado, mostrando pérdidas menores al 5 % durante los primeros 14 días de

almacenamiento y máximas de 11 % cuando se empleó Cargill® Tex-Insta por inyección (Nps, C, inm).



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 40. Porcentaje de exudación en función al tratamiento crioprotector empelado, congelado por aire forzado.

Estos resultados pueden explicarse por los diferentes porcentajes de exudación de los diferentes agentes crioprotector utilizados. El efecto crioprotector de los

polisacáridos en combinación con nanoliposomas protegen las membranas celulares del choque frío (Elliott *et al.*, 2017).

La pérdida por exudación aumenta durante el almacenamiento congelado, por lo tanto, al agregar un agente crioprotector es una importante influencia en la pérdida por exudación. Cuando los gajos de mandarina son descongelados, la humedad se separa fácilmente de la matriz, causando ablandamiento del gajo, resultando en pérdida por exudación. Este hecho puede ser relacionado con el daño mecánico producido por el crecimiento de cristales de hielo en el tejido (Maity *et al.*, 2018).

3.6. Evaluación de color

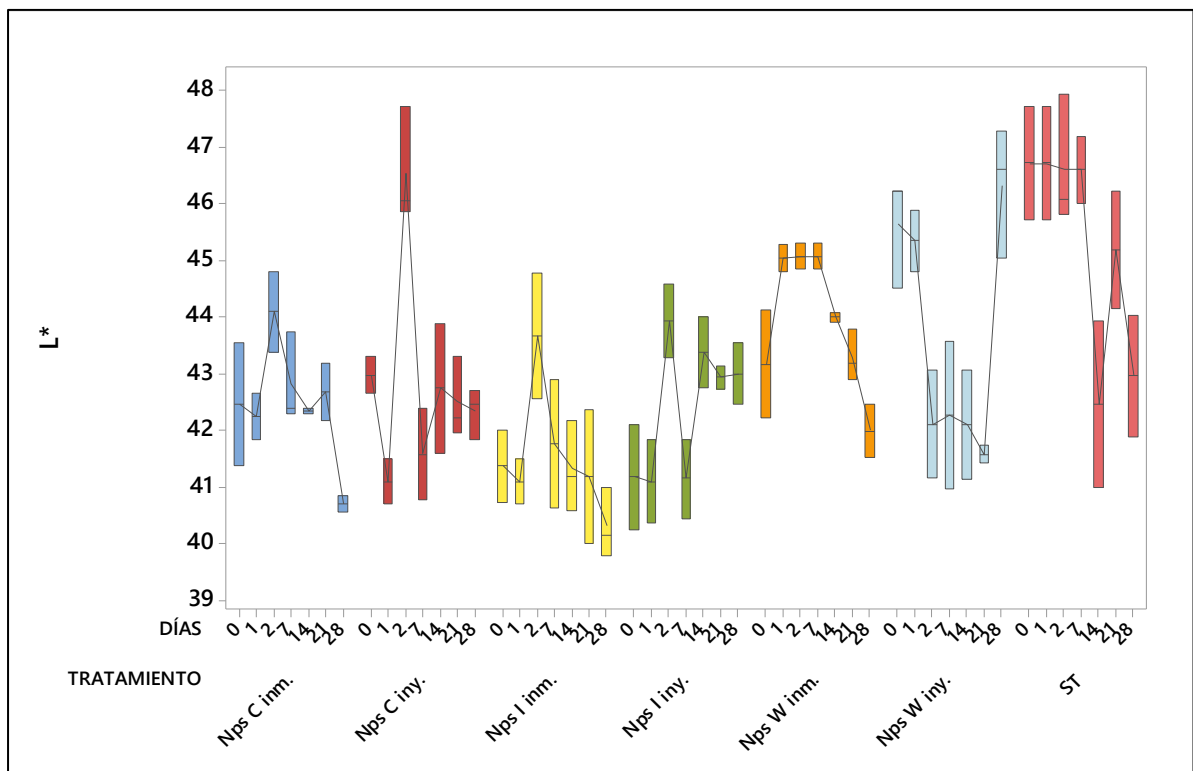
El color de un alimento es el primer factor de calidad que el consumidor aprecia y tiene una influencia notable en su percepción. El color es un indicador del estado natural del alimento; cuando un alimento fresco sufre una transformación (por maduración) o un cambio que ocurre durante su almacenamiento o procesamiento, causando deterioro y pérdida en el color y de nutrientes del alimento (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2005). Los consumidores tienden a asociar el color con el sabor, la seguridad, el tiempo de almacenamiento y la nutrición debido a que se correlaciona bien con las evaluaciones físicas, químicas y sensoriales de la calidad de los alimentos.

El color se debe a los pigmentos naturales, como las clorofilas, los carotenoides y las antocianinas, o a los pigmentos que resultan de las reacciones de pardeamiento enzimático. Para el caso de la naranja y mandarina, el color típico generalmente se debe a una mezcla de carotenoides y, en algunas variedades también de antocianinas (Ladaniya, 2013). Para expresar el color en dimensiones numéricas y valores, es necesario una medición cuantitativa completa, incluidos los atributos de color como el tono (rojo, azul, verde); saturación o croma (intensidad o fuerza de matriz); y luminosidad (brillo u oscurecimiento) de color (Mathias *et al.*, 2014). Los cambios de color han sido considerados indicadores prácticos de la maduración. Según (Camacho, 2014), los cambios de color pueden deberse a procesos ya sea de degradación o síntesis, o de ambos tipos. En las naranjas y mandarinas, el

cambio es consecuencia de la descomposición de la clorofila y de la formación de pigmentos carotenoides.

3.6.1. Luminosidad

La luminosidad es definida como la cantidad de luz emitida o reflejada por un objeto representando su claridad u oscuridad y en propiedades fotométricas, también definida como el flujo luminoso que atraviesa una superficie (Gao *et al.*, 2019).

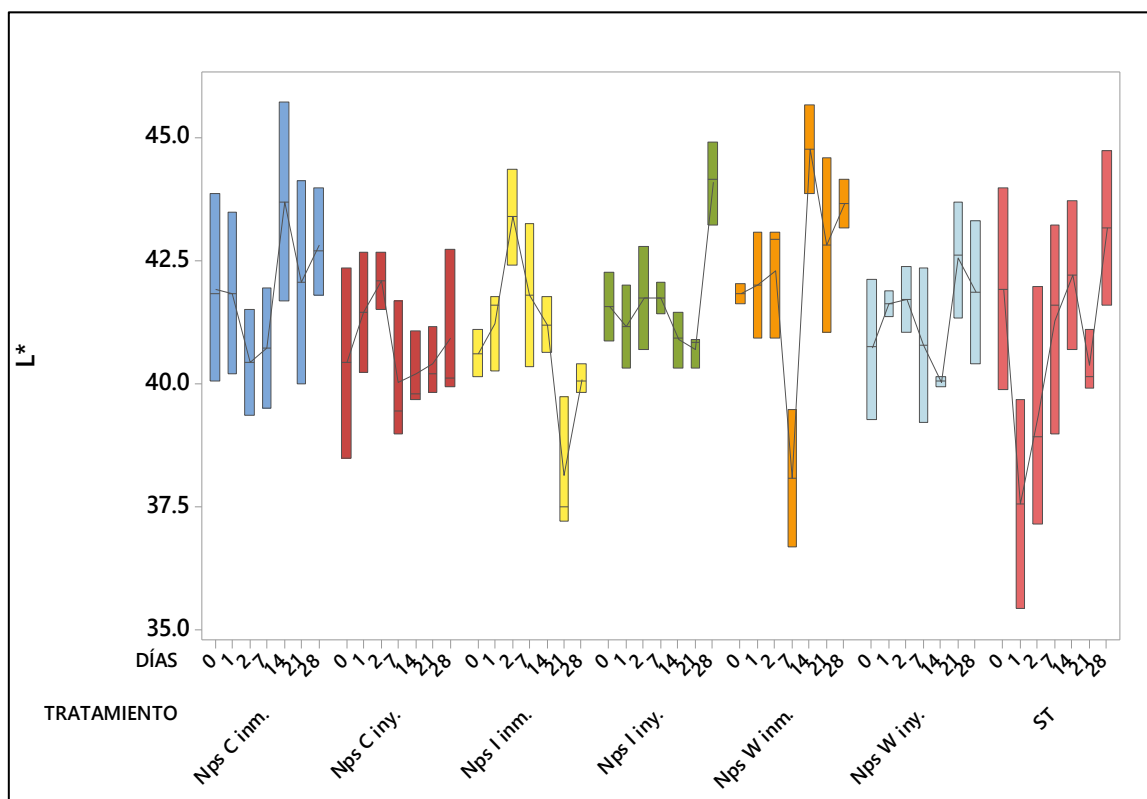


Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 41. Cambios de luminosidad en función al tratamiento para mandarina congeladas por convección natural.

En la Figura 41, se muestran los cambios asociados a la pérdida de luminosidad de gajos de mandarina descongelada. Mostrando que existieron variaciones entre 42 y 48 de luminosidad, siendo las más estables aquellas que emplearon nanoliposomas infiltrados por inmersión, independientemente el tipo de polímero utilizado en el tratamiento.



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 42. Cambios de Luminosidad en función de los tratamientos para mandarina congelada por aire forzado.

La Figura 42, muestra los cambios de luminosidad cuando los gajos fueron congelados empleando aire forzado, observándose menores variaciones que en el caso de los gajos congelados por convección natural.

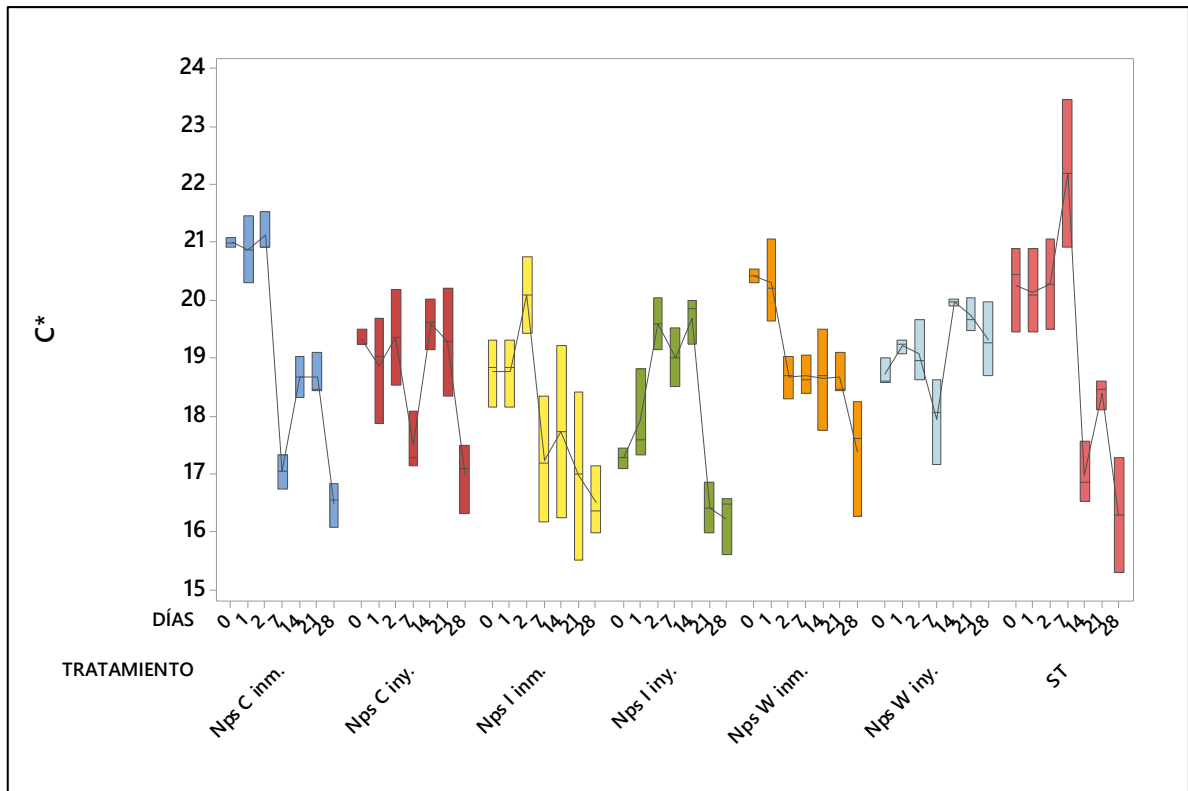
De acuerdo a lo mencionado anteriormente, en las Figuras 38 y 39, se muestran los cambios de luminosidad que tuvieron los gajos de mandarina sometidas a diferentes tratamientos, durante su almacenamiento en congelación (a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), mostrando un descenso de luminosidad con respecto del tiempo de almacenamiento para los gajos de mandarina infiltrados por inmersión y un aumento para los gajos de mandarina infiltrados por inyección, el mayor incremento se observó en 7 días de almacenamiento y posteriormente un descenso hasta el día 21 de almacenamiento.

No existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos utilizados ($\alpha = 0.05$), los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en (Ceballos Adela M., 2012)

3.6.2. Cromaticidad

La cromaticidad (C^*) se define como la saturación, intensidad e impureza; “chroma”, representando la intensidad o pureza espectral del color que va desde tonos grises, pálidos, apagados a los más fuertes y vivos, también es identificado como el grado de color, es decir, incoloro, brillante o pálido (Mathias Rettig *et al.*, 2014).

En la Figura 43, se muestran los cambios de cromaticidad para los gajos de mandarina congelados por convección natural, observándose que los gajos de mandarina sin tratamiento tuvieron una disminución drástica de la tonalidad a partir de los 14 días de almacenamiento haciéndose más opacas debido a la ruptura de las vesículas y pérdida de humedad, por otro lado, los gajos con mayor estabilidad de color fueron las tratadas con N Creamer (Waxy).



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 43. Cambios de cromaticidad en función al tiempo y tratamientos para gajos de mandarina congelados por convección natural.

El chroma se correlaciona con el grado de saturación del color por lo que es un indicativo de la intensidad del color, ese va en una escala de 0 a 100, donde 0 indica una menor intensidad y 100 la mayor intensidad para el color que está expresando en función al ángulo de tono (°Hue) (Camacho, 2014).

En las Figuras 43 y 44, se muestran los cambios de cromaticidad que tuvieron los gajos de mandarina durante el almacenamiento aplicado y el método de congelación.

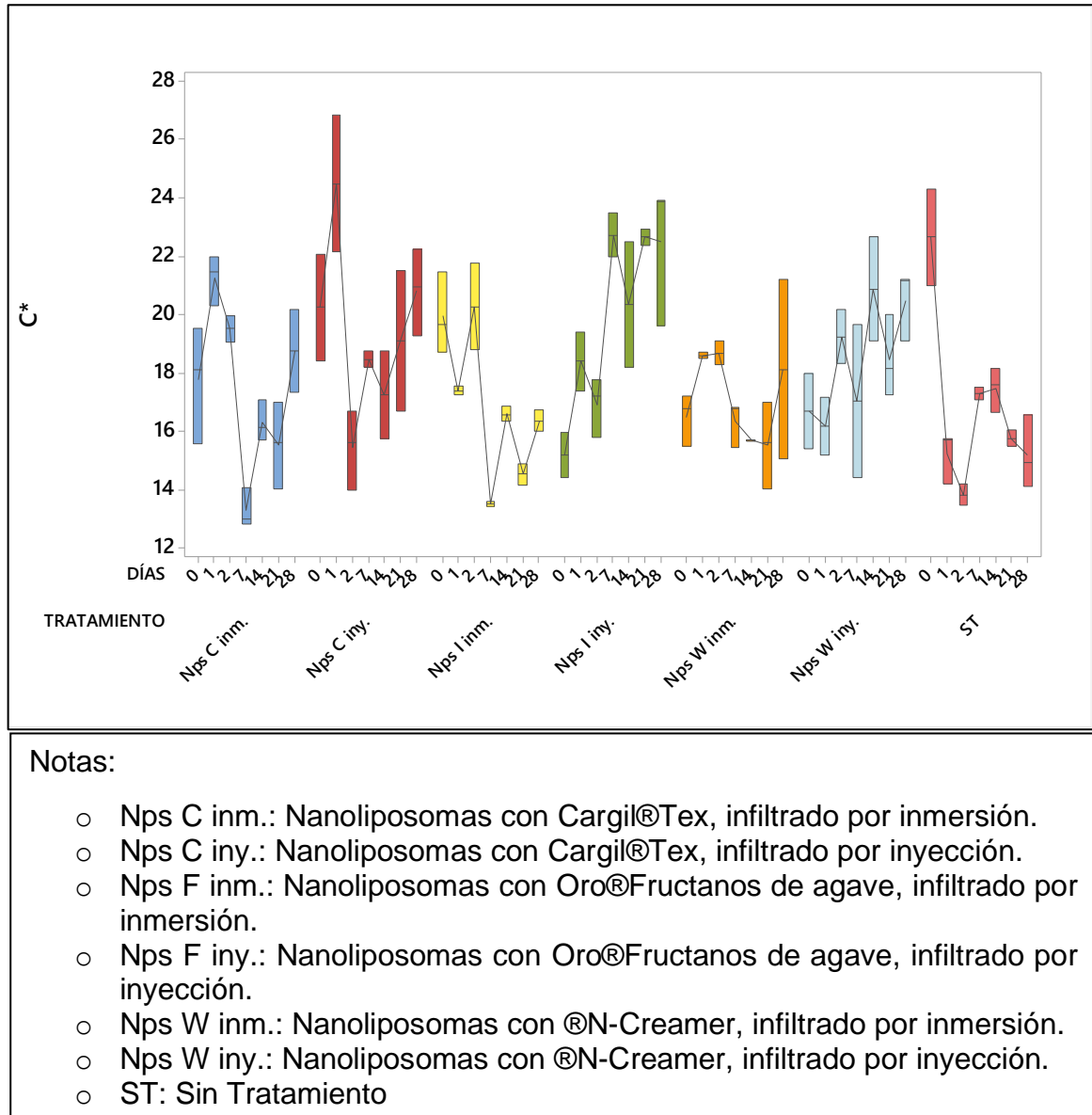


Figura 44. Cambios de cromaticidad en función al tiempo y tratamientos para gajos de mandarina congelados por aire forzado.

En la Figura 43 se aprecia que los gajos de mandarina con los tratamientos y los gajos control tienden a un comportamiento similar, con una disminución de la cromaticidad para los 28 días de almacenamiento; esto ocurre debido al contenido

de carotenoides que contiene la mandarina en el jugo y la pulpa, dando un color amarillo-anaranjado, los carotenoides contenidos están sujetos a cambios químicos o físicos, inducidos por diferentes condiciones de procesamiento o almacenamiento (Badui, 2006), por esta razón, al reducir la actividad de agua por congelación hace que exista una oxidación y subsiguiente desintegración de los carotenoides y finalmente rompiendo con el color característico de los carotenoides.

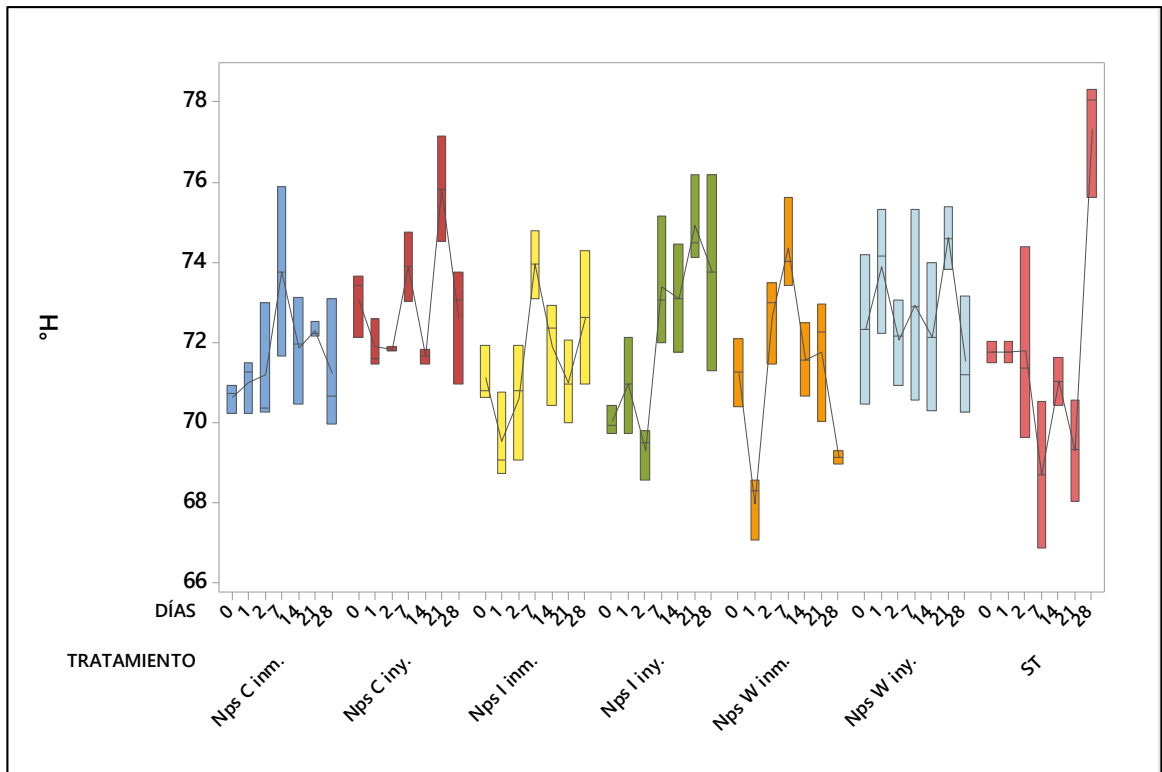
Los resultados obtenidos de cromaticidad son similares a los obtenidos en (Wibowo et al., 2015), donde el valor de la cromaticidad es de 53.50, en el que se muestra diferente al obtenerlo, debido a la utilización de los diferentes tratamientos utilizados.

3.6.3. Ángulo Hue

El tono, tinte o ángulo “hue”, es caracterizado por la longitud de onda de la radiación y hace diferente un color de otro. Representa un espacio en el diagrama de cromaticidad (Mathias Rettig et al., 2014). El tono, °H, varía entre 0 y 360°, y para los estímulos acromáticos ($a^* = b^* = 0$) es una magnitud indefinida.

Los resultados obtenidos de cromaticidad y ángulo de tono se ven modificados por las concentraciones de sólidos solubles totales y la presencia de azúcares totales (Cer, 2007).

En las Figuras 45 y 46 se muestran los cambios del ángulo de tono de los gajos de mandarina con diferentes tratamientos, en el que se observa que influye mayormente en la utilización de un polímero como agente crioprotector en conjunto con los nanoliposomas con aceite esencial de naranja, debido a que los gajos control (que no tuvieron ningún tratamiento) hay un aumento en el ángulo de tono para los 28 días de almacenamiento en comparación a los gajos de mandarina tratadas con los diferentes agente crioprotector, que hay una ligera disminución para los 28 días de almacenamiento.



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 45. Cambio en el ángulo de tono en función al tiempo de almacenamiento y tratamiento para gajos de mandarina congelada por convección natural.

La adición de nanoliposomas con aceite esencial de naranja en conjunto con un agente crioprotector Cargil® Tex-Insta y Oro®Fructanos con una infiltración por inmersión, tuvo un efecto favorable en el ángulo de tono, haciendo que la variación del ángulo de tono tuviese diferencias no significativas, en la Figura 46 se muestra que utilizando estos agentes crioprotectores junto con una congelación por aire

forzado se tiene menos variación del tono en comparación con una congelación por convección natural.

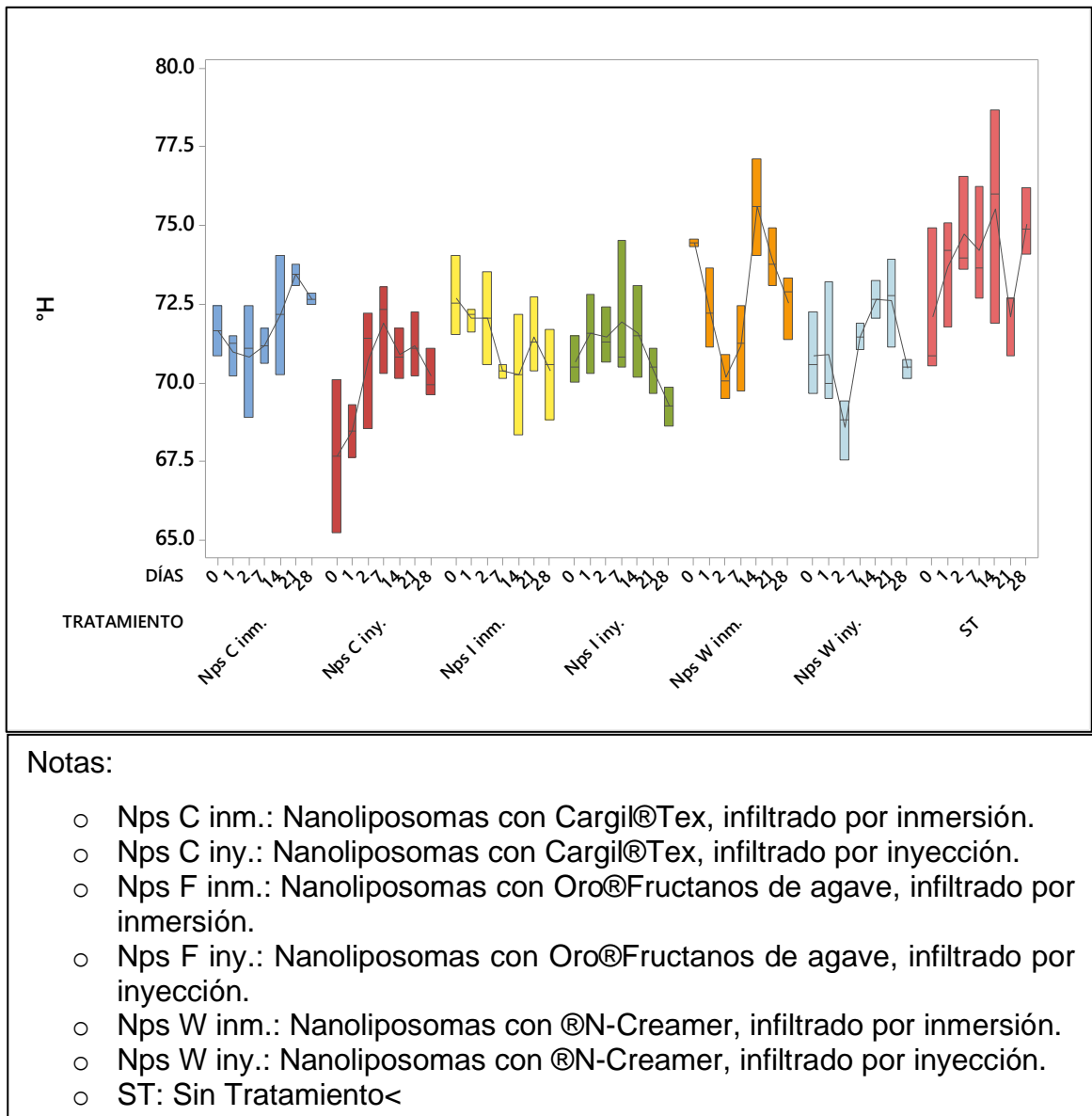


Figura 46. Cambios en el ángulo de tono en función al tiempo de almacenamiento y tratamiento, para mandarina congelada por aire forzado.

Los resultados de análisis estadístico mediante un ANOVA, demostraron que no existe diferencias significativas del tratamiento sobre los resultados obtenidos, de igual forma se observa que, con respecto a los días de almacenamiento existe una ligera disminución del ángulo de tono para los 28 días, existe una constante para 7

y 14 días de almacenamiento, todos los valores obtenidos se encuentran en un rango de tonalidades amarilla-naranja ubicándose en la esfera de cromaticidad (ver Figura 47).

Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en (M.Z *et al.*, 2010) y (Gao *et al.*, 2019), donde el valor de ángulo de tono es amarillo-naranja, los valores obtenidos se notan un poco modificados por los tratamientos utilizados.

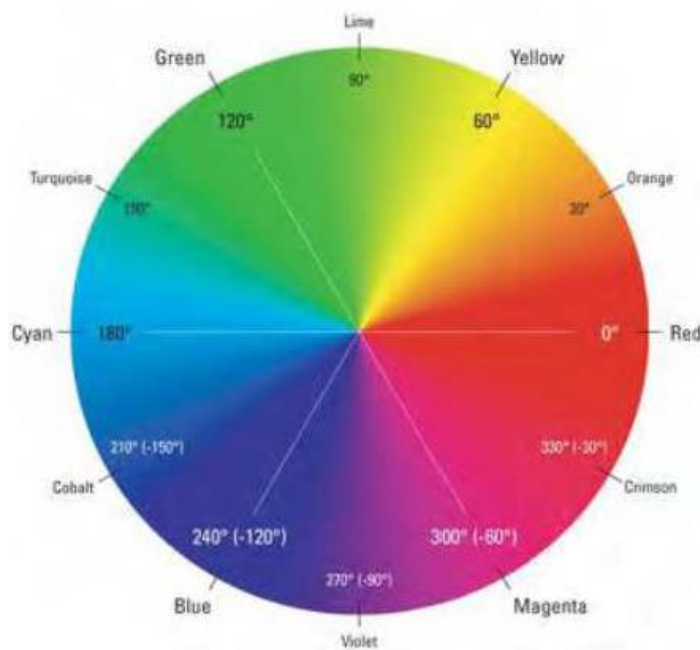


Figura 47. Esfera de cromaticidad

3.7. TEXTURA

La textura es una propiedad sensorial de suma importancia ya que de ella depende la aceptación del producto por parte del consumidor. En la industria alimentaria, se destacan ciertos aspectos en los alimentos con respecto a los parámetros de textura, en donde la dureza es uno de los parámetros más importantes a la hora de obtener un alimento de calidad. Actualmente podemos obtener estos parámetros gracias a la ayuda de equipos como el Texturómetro que puede establecer de manera cuantitativa el comportamiento textural de cualquier alimento, que en

muchas ocasiones varían; ya sea por la influencia de procesos como la temperatura, la humedad, el tiempo de maduración o el tiempo de almacenamiento (Correa *et al.*, 2015).

La influencia de la congelación, almacenamiento congelado y descongelación sobre la calidad de los frutos ha sido investigada extensamente. Las propiedades mecánicas de los alimentos desempeñan un papel primordial en su comportamiento durante el procesamiento, almacenamiento, distribución y consumo. La mayoría de las frutas son suaves en textura, incluso antes de ser congelados y descongelados, sin embargo la congelación tiende a alterar la estructura y destruir la turgencia de las células vivas en los tejidos (Cer, 2007). El ablandamiento en las frutas ha sido relacionado con cambios en la composición de la pared celular, principalmente de pectina, celulosa y hemicelulosa. Durante la maduración de las frutas, estos componentes sufren diferentes reacciones enzimáticas de despolimerización que conducen al ablandamiento (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2005).

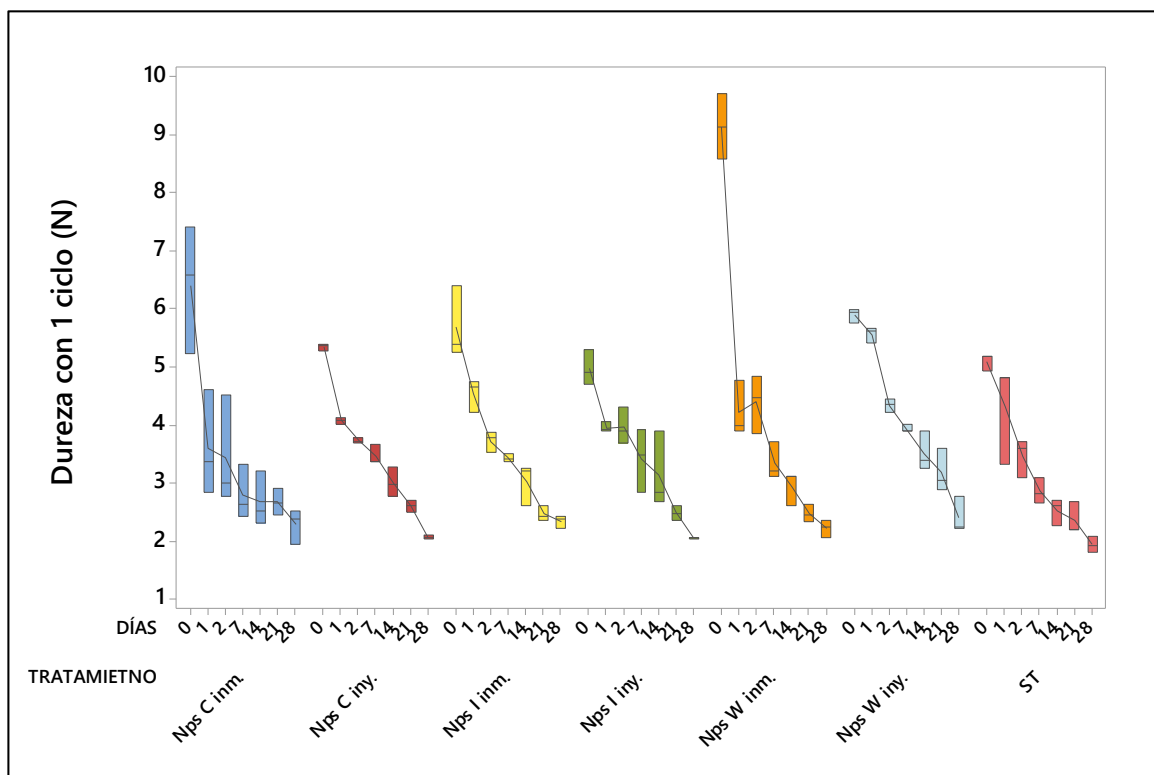
3.7.1. Dureza con 1 ciclo de compresión

Para (Zúñiga *et al.*, 2007), la dureza es la fuerza máxima obtenida durante el primer ciclo de compresión. Se refiere a la fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar.

La dureza de acuerdo con (Correa *et al.*, 2015), es mucho más fácil de apreciar que de medir, se define como la resistencia a la deformación local; al medir la dureza de un alimento, o sea la fuerza requerida para deformarlo se está evaluando si es blando, firme o duro. La medida de la dureza puede ser afectada por muchos factores, tales como la temperatura, humedad, tamaño, forma cuando se realiza la medición.

Se realizó un análisis de varianza (utilizando un nivel de confianza del 95%) ($\alpha = 0.05$) para determinar el efecto de los tratamientos utilizados, los métodos de congelación y el tiempo de almacenamiento en la textura de gajos de mandarina. Se observó que el tiempo de almacenamiento influye en mayor medida sobre la textura de los gajos de mandarían.

(Gómez-Sánchez *et al.*, 2007) afirman que la calidad de la fruta congelada es afectada por los cristales de hielo que crecen en el interior de la pulpa alterando la estructura y destruyendo la turgencia de las células vivas en los tejidos, de igual forma la estructura de la fruta es afectada por fluctuaciones de temperatura durante el almacenamiento congelado.

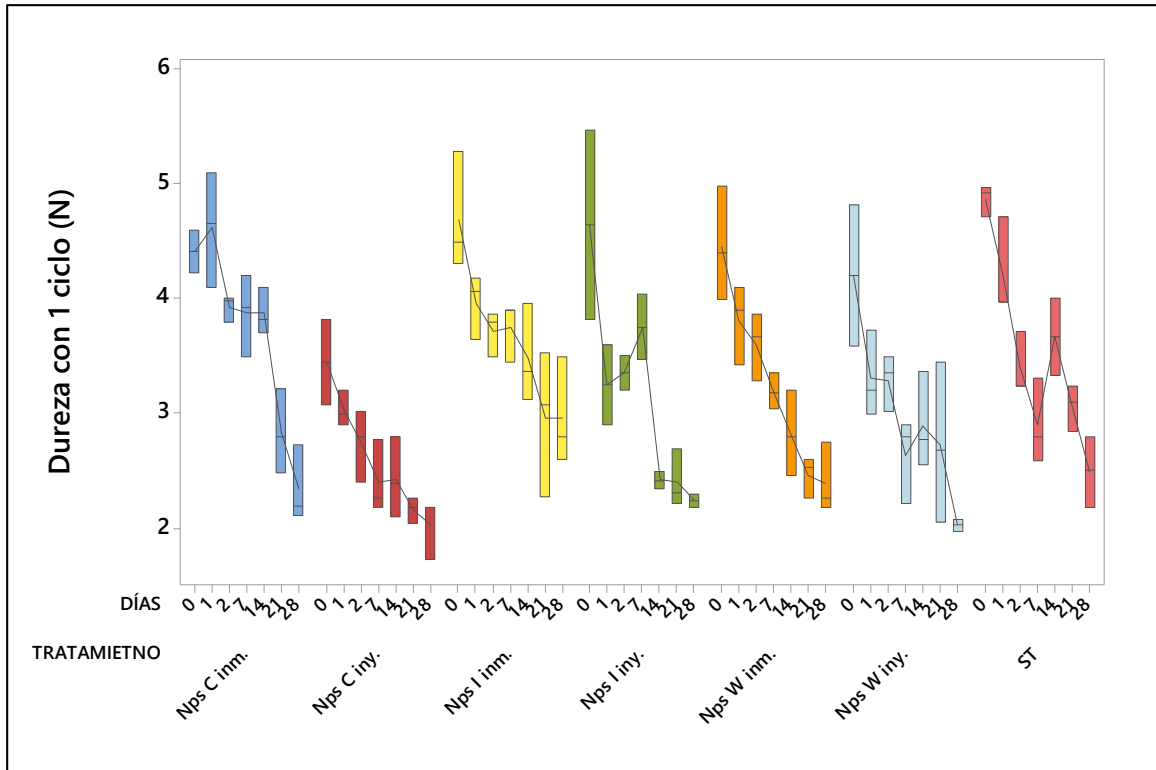


Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 48. Dureza en el primer ciclo de compresión en función a los tratamientos, congelado por convección natural.

En la Figura 48, se observan los cambios de dureza correspondiente al método de congelación por convección natural, durante el almacenamiento a -18 °C, de gajos de mandarina con 3 diferentes tratamientos y en la Figura 49 se muestran los cambios de dureza que corresponde a una congelación por aire forzado, con las mismas condiciones de almacenamiento y con los mismos tratamientos aplicados a los gajos de mandarina congelados por convección natural.



- Notas:
- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
 - Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
 - Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
 - Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
 - Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
 - Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
 - ST: Sin Tratamiento

Figura 49. Dureza en el primer ciclo de compresión en función a los tratamientos, congelado por aire forzado.

La adición de nanoliposomas con aceite esencial de naranja en conjunto con N Creamer (Waxy), como agente crioprotector proporciona una dureza entre 9.7 y 6.36 (N), mientras que para los demás tratamientos este parámetro es menor a los 7 (N) congelados por convección natural, mientras que para una congelación rápida y la adición de nanoliposomas con aceite esencial de naranja en conjunto con Fructanos de Agave (Inulina) y N Creamer (Waxy) como agentes crioprotector proporcionaron una dureza entre 8.95 y 6.99 (N), mientras que para el tratamiento con Cargil® Tex-Insta como agente crioprotector proporcionó una dureza menor. Todos los tratamientos mostraron una tendencia en disminución de la dureza con un solo ciclo para 28 días de almacenamiento.

3.7.2. Deformación Según Dureza

La deformación según dureza o la tasa de deformación, que es el coeficiente que expresa el cambio de tamaño en un cuerpo debido a las fuerzas aplicadas sobre el mismo; para que ellas brinden información objetiva que se pueda comparar bajo condiciones estandarizadas (Correa *et al.*, 2015).

En la Figura 50, muestra el comportamiento de deformación según dureza que tuvieron los gajos de mandarina con diferentes tratamientos, métodos de infiltración, y congelación, conforme a los 28 días de almacenamiento.

(Zúñiga *et al.*, 2007) atribuye que los cambios en las propiedades reológicas durante el almacenamiento en congelación están relacionados con la recristalización, asociada a cambios en el tamaño, número y forma de los cristales de hielo, que son causadas por las fluctuaciones de temperatura durante el almacenamiento en congelación.

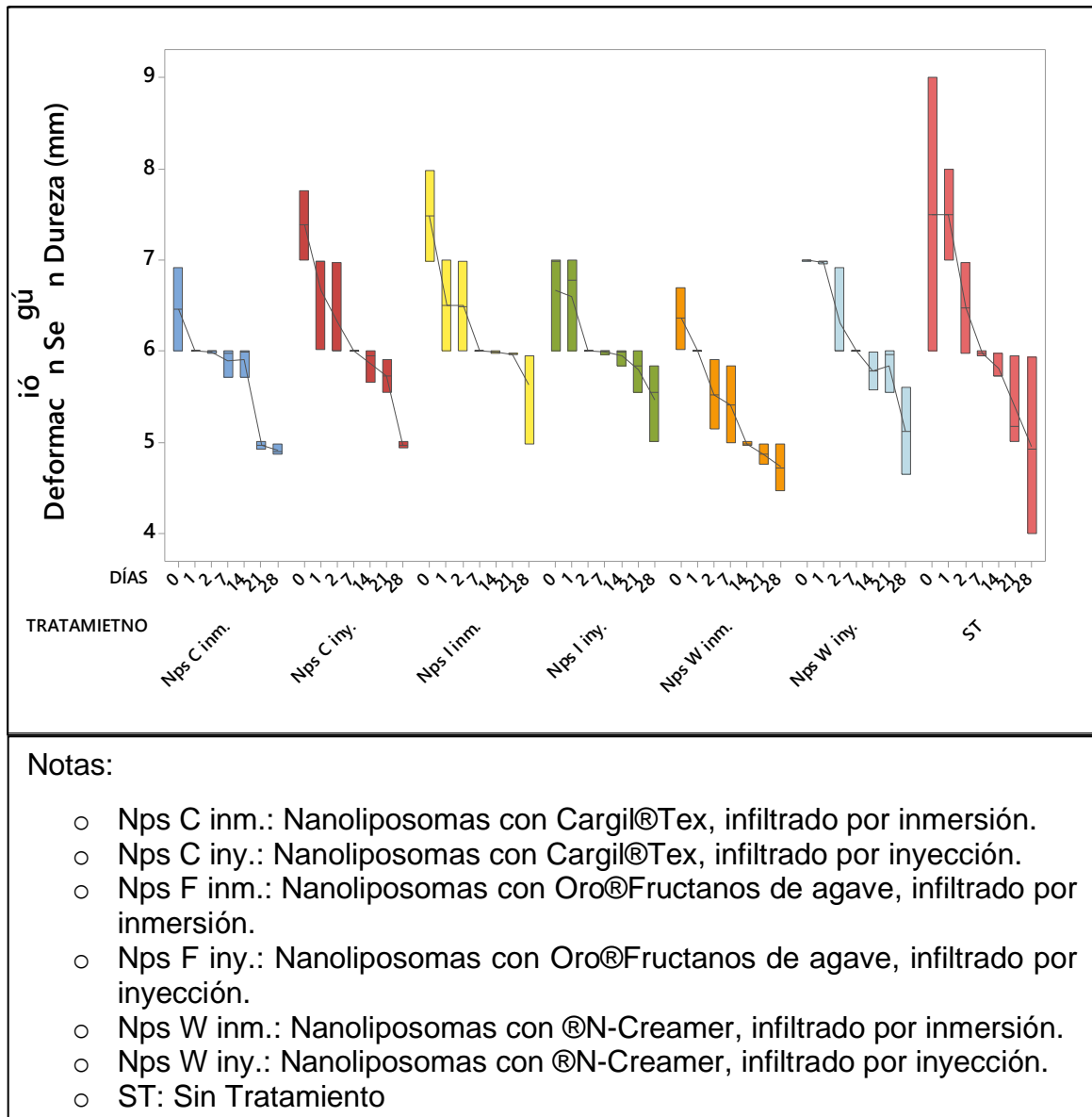
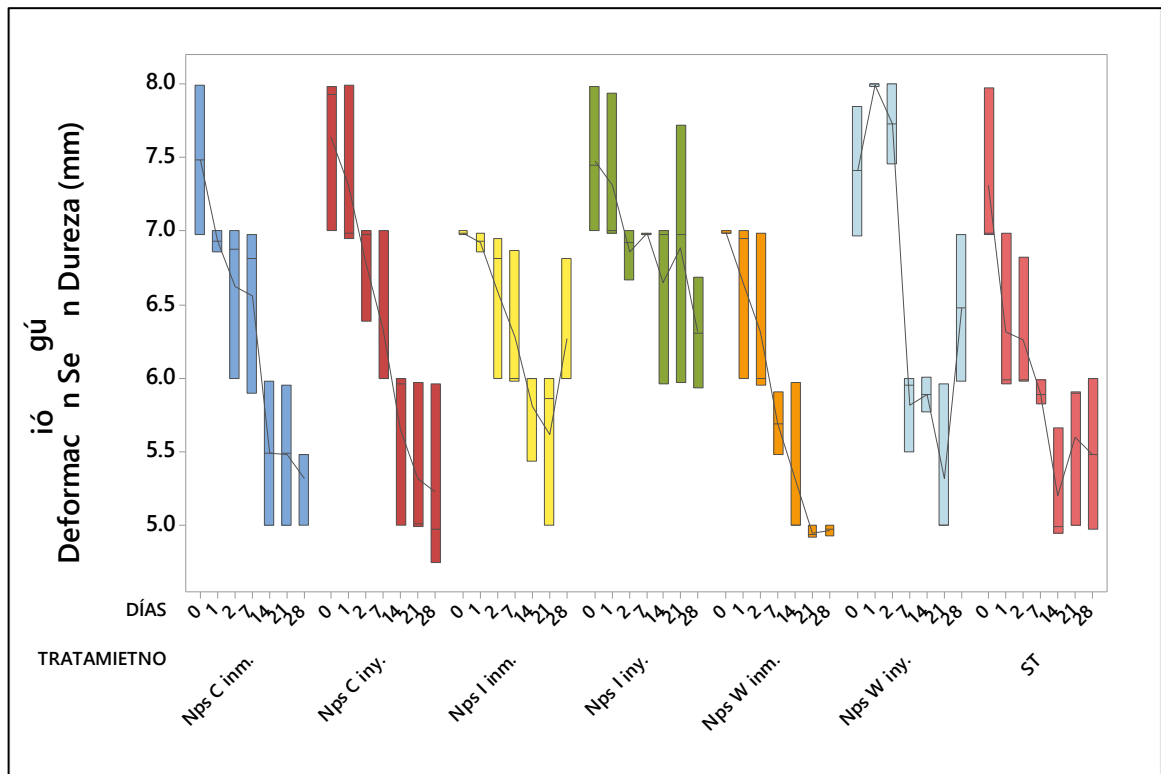


Figura 50. Deformación Según Dureza en función de los tratamientos aplicados congelado por convección natural.

La Figura 50 muestra la deformación según dureza de los gajos de mandarina que fueron sometidos a una congelación por convección natural, mientras que la Figura 51 muestra el comportamiento de la deformación según dureza de los gajos de mandarina que fueron sometidas a una congelación por aire forzado; cómo se puede observar el rango de deformación de los gajos de mandarina que no fueron tratados va desde 5.18 a 1.9 mm, para una congelación por convección natural, los

gajos que fueron sometidos a una congelación por aire forzado van desde 7.97 a 3 mm; los tratamientos aplicados expresan una disminución de la deformación según dureza con respecto al tiempo.



Notas:

- Nps C inm.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inmersión.
- Nps C iny.: Nanoliposomas con Cargil®Tex, infiltrado por inyección.
- Nps F inm.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inmersión.
- Nps F iny.: Nanoliposomas con Oro®Fructanos de agave, infiltrado por inyección.
- Nps W inm.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inmersión.
- Nps W iny.: Nanoliposomas con ®N-Creamer, infiltrado por inyección.
- ST: Sin Tratamiento

Figura 51. Elasticidad en función de los tratamientos aplicados, congelado por aire forzado.

Los resultados obtenidos son aproximados a los reportados por (Bulut *et al.*, 2018) en fresas congeladas con dos tipos de congelación, donde se obtuvieron valores de 7.40 – 6.23 mm. Se realizó un análisis de varianza en el cual se indica que no existe

un efecto significativo de los tratamientos aplicados ($\alpha = 0.05$), sin embargo, se observa una pérdida de deformación de los gajos de mandarina conforme se incrementó el tiempo de almacenamiento, para todos los tratamientos, y para las muestras que no tuvieron ningún tratamiento se tiene una mayor pérdida de elasticidad.

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que la aplicación de nanoliposomas con aceite esencial de naranja en conjunto con un crioprotector en la congelación y almacenamiento de un alimento puede resultar efectiva para mejorar las características del alimento como la textura y los cambios de color que presenta el producto durante su almacenamiento en congelación, el crecimiento de los cristales durante el proceso de congelación y, el porcentaje de pérdida de peso y exudación después de ser descongelado.

El efecto que proporciona el tratamiento de nanoliposomas con aceite esencial de naranja en conjunto con el agente crioprotector N Creamer (Waxy) en los gajos de mandarina contribuyo principalmente a la conservación de sus propiedades presentando una mayor estabilidad al aumento o disminución de peso por la inmersión o inyección de los nanoliposomas; debido a la acción de las pectinas y carotenoides presentes en la pulpa de los gajos de mandarina en combinación con un polisacárido se refuerzan las paredes celulares, en consecuencia de esto se ven beneficiadas los parámetros como la firmeza, dureza, como sus propiedades físicas y fisicoquímicas

Los parámetros de calidad analizados (tamaño de cristal de hielo, pérdida de peso, porcentaje de exudación o porcentaje de líquido drenado, cambios en la luminosidad, cromaticidad y ángulo de tono, así las propiedades texturales) están relacionados con la velocidad de congelación, la cual es una consecuencia del tratamiento utilizado y el método de congelación empleado (por convección natural

o con aire forzado); es decir, los atributos de calidad se encuentran influenciados por el tratamiento empleado y la velocidad con que se produce la congelación, de tal forma que cuando la congelación es rápida, las pérdidas de los atributos de calidad sobre el producto resultan considerablemente menor en comparación a una congelación lenta o la no utilización de nanoliposomas en conjunto con un agente crioprotector.

La utilización de un agente crioprotector en la congelación y almacenamiento, puede resultar efectiva para mejorar las características de la mandarina, disminuyendo su actividad enzimática y minimizando el tamaño de cristales de hielo en la congelación.

REFERENCIAS

- Agoulon, A. (2012). Impacto de los parámetros de congelación en las características de los alimentos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4, 107–121.
- Amaral do Evangelho *et. al.*, (2019). Antibacterial activity, optical, mechanical, and barrier properties of corn starch films containing orange essential oil. *Carbohydrate Polymers*, 222(June), 114981. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114981>
- Anderson, H. B., & Beñatena, H. N. (2012). Los cítricos. In *Food Chemistry* (EEA INTA C, pp. 1–6). Argentina: 2012.
- ASHRAE. (2006). Thermal properties of foods. *ASHRAE Handbook*, 1998, 8.1-8.30.
- Ávalos Fúnez, A., Haza Duaso, A. I., & Morales Gómez, P. (2016). Nanotecnología en la industria alimentaria I: aplicaciones. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 10(2), 1–17. https://doi.org/10.5209/rev_rccv.2016.v10.n2.53544
- Badui, D. S. (2006). *Química de los alimentos* (Cuarta ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Bajpai *et al.*, (2018). Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security. *Journal of Food and Drug Analysis*, 26(4), 1201–1214. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.06.011>
- Barbosa *et al.*, (2005). *Freezing of fruits and vegetables* (FAO, ed.). Roma: FAO.
- Barreiro, J. A. (2006). *Operaciones de Conservación de Alimentos por Bajas Temperaturas - Barreiro y Sandoval.pdf*.
- Barreiro M., J. A., & Sandoval B., A. J. (2006). *Operaciones de Conservación de Alimentos por Bajas Temperaturas* (Primera ed; EQUINOCCIO, Ed.). Venezuela.
- Bulut, M., Bayer, Ö., Kırıl, E., & Bayındırlı, A. (2018). Incidence de la vitesse de congélation et de la durée d'entreposage sur les paramètres de texture et de qualité de fraises et de haricots verts congelés dans un dans un congélateur domestique. *International Journal of Refrigeration*, 88, 360–369.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.030>

- Cai *et al.*, (2008). An Active Defrost Scheme with a Balanced Energy Consumption and Food Quality Loss in Supermarket Refrigeration Systems. In *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 41). <https://doi.org/10.3182/20080706-5-kr-1001.01584>
- Camacho, C. J. (2014). *DETERMINACIÓN DEL COLOR DEL EXOCARPIO COMO INDICADOR DE DESARROLLO FISIOLÓGICO Y MADUREZ EN LA GUAYABA PERA (Psidium guajava cv . Guayaba pera),*. 79–89.
- Campañone, L. A., Salvadori, V. O., & Mascheroni, R. H. (2005). Food freezing with simultaneous surface dehydration: Approximate prediction of weight loss during freezing and storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(6), 1195–1204. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.031>
- Canet, W., & National, S. (2017). *Influencia del proceso de congelación sobre la textura de vegetales . Efecto del escaldado y la velocidad de congelación sobre la textura de zanahoria.* (January 1983).
- Carranza, R. (2000). Congelación de alimentos. *Ciencia & Desarrollo*, 26(4), 68–72.
- Casas-Alencáster, N. B. (2005). Análisis de perfil de textura y propiedades de relajación de geles de mezclas de almidón de maíz ceroso. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4, 107–121.
- Ceballos Adela M., G. G. I. (2012). *Evaluación del efecto de la velocidad del aire en el proceso de congelación sobre propiedades mecánicas y la capacidad de retención de agua en carne de bovino.pdf* (pp. 360–365). pp. 360–365.
- Cer, T. G., & Rodr, V. (2007). *Aspectos tecnológicos de la congelación en alimentos.* 1, 80–96.
- Correa, D. A., Torres, J. D., & Gonzales-Morelo, K. (2015). *Análisis del Perfil de Textura en Frutas, Productos Cárnicos y Quesos.* (November).
- da Rosa Zavareze, E., Telles, A. C., Mello El Halal, S. L., da Rocha, M., Colussi, R., Marques de Assis, L., ... Prentice-Hernández, C. (2014). Production and characterization of encapsulated antioxidative protein hydrolysates from Whitemouth croaker (*Micropogonias furnieri*) muscle and byproduct. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2P1), 841–848. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.013>
- Darmawan, D. (2019). Introduction to Food Engineering. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Eduardo, C., & Alzate, O. (2008). *Congelación y liofilización de alimentos* (Primera ed). Colombia: Manizales, Caldas, Colombia.

- Elliott, G. D., Wang, S., & Fuller, B. J. (2017). Cryoprotectants: A review of the actions and applications of cryoprotective solutes that modulate cell recovery from ultra-low temperatures. *Cryobiology*, 76, 74–91. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2017.04.004>
- Evans, J. A. (2013). Frozen Food Science and Technology. In Blackwell (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). UK: FRPERC Food Refrigeration and Process Engineering Research Centre.
- F., G., & McClung, C. J. and J. P. (2017). Vitamin C. In *The Vitamins, Fundamental Aspects in Nutrition and Health* (Fifth Edit, pp. 267–295).
- Gao *et al.*, (2019). Scientia Horticulturae Changes of peel color and fruit quality in navel orange fruits under different storage methods. *Scientia Horticulturae*, 256(March), 108522. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.049>
- García *et al.*, (2017). *Tecnologías de nano/microencapsulación de compuestos bioactivos* (Primera ed; Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco., Ed.). México, Jalisco: CIATEJ.
- Gómez *et al.*, (2007). *Aspectos tecnológicos de la congelación en alimentos*. 1, 80–96.
- Gonalves *et al.*, (2011). Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. *International Journal of Refrigeration*, 34(8), 2136–2144. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.06.006>
- Goycoolea *et al.*, (2013). Nanopartículas a base de polisacáridos. *Centro de Investigación En Alimentos y Desarrollo*, (3), 103–131.
- Heldman, D. R., & Lund, D. B. (2007). *Handbook Of Food Engineering* (Second Ed; Taylor & Francis Group, Ed.). New York: CRC Press.
- Helen, C. (2000). Tecnología de congelación de alimentos. *Ciencia & Desarrollo de Alimentos*, 7(4), 1–26.
- Hevia, J. T. (2007). *MANUAL DE MANEJO POSTCOSECHA DE FRUTAS TROPICALES (Papaya, piña, plátano, cítricos) Tomado el 26 de junio de 2007 de:*
<http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/ac304s/ac304s00.htm>.
- Hurtado, G. (2014). *Konica Minolta CR-300.pdf* (pp. 37–61). pp. 37–61. New York: MINOLTA.
- Jimenez-Avalos, H. A., Chaires-Martinez, L., & Perez-Vargas, M. A. (2013). Prediction of freezing time and evaluation of the effect of frozen storage on textural properties of white trout fillets. *Food Science and Technology Research*, 19(3), 375–379. <https://doi.org/10.3136/fstr.19.375>

- Ladaniya, M., & Soares, A. P. (2013). Citrus Fruit: Biology, Technology and Evaluation. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Elsevier, Vol. 53). London: Elsevier.
- Liu *et al.*, (2019). Molecular, crystal and physicochemical properties of granular waxy corn starch after repeated freeze-thaw cycles at different freezing temperatures. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 346–353. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.111>
- M.Z Malaysia *et al.*, (2010). *lacristales-de-hielo2010Journal-of-Applied-Sciences.pdf*.
- Madison, W. (1988). *Amount and Size of Ice Crystals in Frozen Samples as Influenced by Hydrocolloids*. (12), 2630–2639. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79856-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79856-2)
- Maity, T., Saxena, A., & Raju, P. S. (2018). Use of hydrocolloids as cryoprotectant for frozen foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(3), 420–435. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1182892>
- Martinez *et al.*, (2007). *Descripción y aplicaciones de equipos de congelación para la industria de alimentos.pdf* (pp. 97–107). pp. 97–107.
- Mathias Rettig *et al.*, (2014). *El color en los alimentos un criterio de calidad medible Color in food as a measurable quality criterion*. 42(2), 57–66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n2-07>
- Mazloomi *et al.*, (2020). Physicochemical properties of chitosan-coated nanoliposome loaded with orange seed protein hydrolysate. *Journal of Food Engineering*, 280(February). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109976>
- Moreno-Vilet, L., Camacho-Ruiz, R. M., & Portales-Pérez, D. P. (2016). Prebiotic Agave Fructans and Immune Aspects. In *Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics: Bioactive Foods in Health Promotion* (pp. 165–179). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802189-7.00011-3>
- Mulot *et al.*, (2019). Investigating the effect of freezing operating conditions on microstructure of frozen minced beef using an innovative X-ray micro-computed tomography method. *Journal of Food Engineering*, 262(May), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.014>
- Olivera F., D., & Salvadori O., V. (2009). Effect of freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.041>
- Ötles, S. (2012). *Methods of Analysis of Food Components and Additives* (Second Edi; Tylor & Francis Group, Ed.). New York: CRC Press.
- Paula *et al.*, (2019). LWT - Food Science and Technology Characterization of nanoliposomes containing bioactive peptides obtained from sheep whey hydrolysates. *LWT - Food Science and Technology*, 101(May 2018), 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.036>

- Pintor *et al.*, (2018). The influence of agave fructans on thermal properties of low-fat, and low-fat and sugar ice cream. *Lwt*, 93(March), 679–685. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.060>
- Qiu, C., Yang, J., Ge, S., Chang, R., Xiong, L., & Sun, Q. (2016). Preparation and characterization of size-controlled starch nanoparticles based on short linear chains from debranched waxy corn starch. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.062>
- Reno *et al.*, (2011). Heat transfer and energy consumption in the freezing of guava pulp in large containers. *Applied Thermal Engineering*, 31(4), 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.015>
- Rodríguez *et al.*, (2019). A rheological study of chicory and agave tequilana fructans for use in foods. *Lwt*, 115(January), 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.035>
- Sarabandi *et al.*, (2019). Protection of casein hydrolysates within nanoliposomes: Antioxidant and stability characterization. *Journal of Food Engineering*, 251(December 2018), 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.004>
- Sebastián, S., Ceballos-Peñaloza, A. M., & Gutiérrez-Mosquera, L. F. (2019). Evaluación de los parámetros del proceso de congelación para la pulpa de Açaí. *TecnoLógicas*, 22(46), 25–38. <https://doi.org/10.22430/22565337.1117>
- Smith, C. E., & Schwartzberg, H. G. (1885). *Ice Crystal Size Changes During Ripening in Freeze Concentration*. 111–120.
- Spreen, T. H. (2010). *Proyecciones De La Producción Y Consumo Mundial De Los Cítricos*. 5–12.
- Toriz, G., Delgado, E., & Zúñiga, V. (2007). A proposed chemical structure for fructans from blue agave plant (Tequilana Weber var. azul). *Revista Electrónica y Tecnológica E-Gnosis*, 5(5), 1.
- Vázquez, D. E. (2003). Comportamiento post-cosecha de frutos de mandarina nova en almacenamiento frigorífico prolongado. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 5(1), 16–25.
- Vicent, V., Ndoye, F. T., Verboven, P., Nicolai, B., & Alvarez, G. (2020). Modeling ice recrystallization in frozen carrot tissue during storage under dynamic temperature conditions. *Journal of Food Engineering*, 278(January). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109911>
- Visakh, P. M., Sabu, T., Iturriaga, L. B., Ribotta, P. D., & Haghi, A. K. (2013). Advances in food science and technology. In *Advances in Food Science and Technology*.
- Wibowo *et al.*, (2015). Colour and carotenoid changes of pasteurised orange juice during storage. *Food Chemistry*, 171, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.007>

- Włodarczyk *et al.*, (2017). Physicochemical properties of waxy corn starch after three-stage modification. *Food Hydrocolloids*, 62, 182–190.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.010>
- Zacarias, L. (2011). Tangerine , Clementine , Grapefruit ,. *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits: Volume 2: Açai to Citrus*, (1996), 437-516e. <https://doi.org/10.1533/9780857092762.437>
- Zambrano-Zaragoza, M. de la L. (2013). *Desarrollo y caracterización de sistemas nanopartículados con ingredientes alimenticios como vectores para incrementar la vida útil de alimentos*, Universidad Autónoma de Querétaro, 4, 14-20.
- Zou, Z., Xi, W., Hu, Y., Nie, C., & Zhou, Z. (2016a). Antioxidant activity of Citrus fruits. *Food Chemistry*, 196, 885–896.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072>
- Zou, Z., Xi, W., Hu, Y., Nie, C., & Zhou, Z. (2016b). Antioxidant activity of Citrus fruits. *FOOD CHEMISTRY*, 196, 885–896.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072>
- Zúñiga, L., Hernandez, A., Ciro, H., Velásquez, J., Osorio, J., & Saraz, A. (2007). Estudio De La Dureza Del Queso Edam Por Medio Del Analisis De Perfil De Textura Y Penetrometria Por Esfera. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 60(1), 3797–3811. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v60n1/a12v60n1.pdf>

ANEXOS

ANEXO A. Propiedades térmicas de alimentos

Las propiedades térmicas de la mandarina fueron calculadas a partir de las ecuaciones mostradas en la tabla A, las cuales se basan en la composición química del alimento.

Tabla A. Modelos de propiedades térmicas para componentes de alimentos ($-40^{\circ} \text{C} \leq T \leq 150^{\circ} \text{C}$) (ASHRAE, 2006).

Propiedad térmica	Componente	Ecuación de propiedad térmica
Conductividad térmica, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$	Proteína	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}t - 2.7178 \times 10^{-6}t^2$
	Grasa	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3}t - 1.7749 \times 10^{-7}t^2$
	Carbohidratos	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}t - 4.3312 \times 10^{-6}t^2$
	Fibra	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}t - 3.1683 \times 10^{-6}t^2$
	Ceniza	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}t - 2.9069 \times 10^{-6}t^2$
Densidad, kg/m	Proteína	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}t$
	Grasa	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}t$
	Carbohidratos	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}t$
	Fibra	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}t$
	Ceniza	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}t$
Calor específico, $KJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$	Proteína	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}t - 1.3129 \times 10^{-6}t^2$
	Grasa	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}t - 4.8008 \times 10^{-6}t^2$
	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	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}t - 3.6817 \times 10^{-6}t^2$

Se calculó las propiedades térmicas de los gajos de mandarina en estado congelado y no congelado. La humedad promedio fue de 86%. Los resultados se muestran en la Tabla B.

ANEXO B. Propiedades térmicas de los gajos de mandarina

Tabla B. propiedades térmicas de la mandarina

	Producto no congelado			Producto congelado		
	Cp kJ/(kg. °C)	Kt W/(m.°C)	ρ kg/m ³	Cp kJ/(kg.°C)	Kt W/(m.°C)	ρ kg/m ³
Mandarina	1.6939	0.2327	1.5608	1.6277	0.2172	1.5764

Con los valores anteriores (Cp, Kt y ρ) y la temperatura en la cual se llevó el proceso de congelación, se realizó el cálculo de diferencia de entalpía para la congelación por convección natural y la congelación por aire forzado.

- Congelación por convección natural

$$\Delta H = (1 + 0.00445(20 + 1.4)^{\circ}C) \left(1.6939 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} (20 + 1.4)^{\circ}C \right) + 277.905 \frac{kJ}{kg} + 3.757 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} (-1.4 + 20)^{\circ}C = 352.23 \frac{kJ}{kg}$$

- Congelación por aire forzado

$$\Delta H = (1 + 0.00445(18 + 1.4)^{\circ}C) \left(1.6939 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} (18 + 1.4)^{\circ}C \right) + 277.905 \frac{kJ}{kg} + 3.757 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} (-1.4 + 20)^{\circ}C = 383.48 \frac{kJ}{kg}$$

ANEXO C. Constantes de la ecuación de Plank

Para poder utilizar la ecuación de Nagaoka se requiere del coeficiente de transferencia de calor (convección natural y convección de aire forzado) y el valor de las constantes geométricas R y P, son constantes geométricas cuyos valores cambian de acuerdo con la forma de la muestra, estos datos se encuentran en las Tablas C y D.

Tabla C. Valores de las constantes de la ecuación de Plank (Gómez-Sánchez et al., 2007).

Forma	P	R
Placa infinita	½	1/8

Cilindro infinito	¼	1/16
Esfera	1/6	1/24

Tabla D. Coeficientes convectivos de transferencia de calor durante el proceso de congelación (Gómez-Sánchez et al., 2007).

Condición	Coeficiente de transferencia de calor (W/m²K)
Circulación natural	5
Chorro de aire	22
Congelación por contacto de placas	56
Circulación lenta en salmuera	56
Circulación rápida en salmuera	85

Cálculo del tiempo de congelación utilizando la ecuación de Nagaoka

- Congelación por convección natural

$$t_f = \frac{352.23 \frac{kJ}{kg} \times 1030 \frac{kg}{m^3} \times 1000 \frac{J}{kJ}}{3600 \frac{s}{h} (-1.4 + 28.5)^\circ C} \left[\frac{1}{8} (0.013)^2 + \frac{1}{2} (0.013) \right] \left[\frac{0.558 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}{5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} \right] = 4.97 h$$

- Congelación por aire forzado

$$t_f = \frac{383.48 \frac{kJ}{kg} \times 1030 \frac{kg}{m^3} \times 1000 \frac{J}{kJ}}{3600 \frac{s}{h} (-1.4 + 28.5)^\circ C} \left[\frac{1}{8} (0.013)^2 + \frac{1}{2} (0.013) \right] \left[\frac{0.558 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}{22 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} \right] = 1.34 h$$