



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

APLICACIÓN DE LA CONGELACIÓN MIXTA
(CRIOGÉNICA-MECÁNICA, MECÁNICA-CRIOGÉNICA) EN
BRÓCOLI Y ZANAHORIA.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:
MARVELIA JAZMIN MEDINA RUEDAS

ASESOR: I.A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

**ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales
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 el: Trabajo de Tesis

Aplicación de la congelación mixta (criogénica-mecánica, mecánica-criogénica) en brócoli y zanahoria

Que presenta el pasante: Marvelia Jazmin Medina Ruedas
Con número de cuenta: 405091719 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería 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 16 de Febrero de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. José Jaime Flores Minutti	
VOCAL	I.A. Alfredo Álvarez Cárdenas	
SECRETARIO	I.A. Manuel Alarcón López	
1er. SUPLENTE	Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza	
2do. SUPLENTE	M. en C. Víctor Manuel Avalos Avila	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

IHM/mmem*

Quiero agradecer siempre a...

Paulino Medina y Lucia Ruedas por la gran maravilla de la vida.

Maurilia Blancas por estar siempre conmigo y ser una gran abuelita.

Jair Echeverria por el apoyo incondicional y la vida juntos.

Alma Delia por el amor de hermanas, el apoyo y la bendición de tener entre nosotros a los más pequeños de la familia.

Nora Isela por el apoyo, la infancia junta y el amor de hermanas.

Ing. Alfredo por los conocimientos, el apoyo, los consejos, la paciencia y la dedicación que me compartió y sobretodo que lo hacen un gran profesor.

Ing. Francisco López por los consejos y conocimientos compartidos para mejorar nuestro aprendizaje durante la preparación universitaria.

Juana Rocío por el cariño de amigas, el tiempo que hemos compartido y el apoyo que siempre me has demostrado amiga.

A todas las personas que han estado en cada etapa de mi vida aportándome conocimientos, apoyo, amor y momentos maravillosos.

Algo para compartir...

Cuanto más alto coloque el hombre su meta, tanto más crecerá.

Las dificultades hacen que la mente se fortalezca, como el trabajo lo hace con el cuerpo (Séneca).

El pesimista se queja del viento, el optimista espera que cambie, el realista ajusta las velas (William George).

La vida no es fácil para nadie. ¿Y qué importa? Debemos tener perseverancia y confianza en nosotros mismos; creer que poseemos un don para algo y que ese algo debe ser realizado (Marie Curie).

Creer que hay garantías de éxito es una ilusión vana. No hay fórmulas ni red, sólo hay coraje, sueños y pasión (Julia Soler).

Todos los actos humanos se originan en una o más de estas causas: oportunidad, personalidad, impulso, hábito, anhelo, pasión (Aristóteles).

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue evaluar la influencia en brócoli y zanahoria de la congelación mixta empleando dos métodos de congelación combinándolos a diferentes temperaturas durante la etapa de máxima formación de núcleos de hielo y crecimiento de cristales. Se analizaron los efectos de la congelación mecánica-criogénica y criogénica-mecánica, mediante el ensayo de penetración, registros de la pérdida de peso en muestras y la velocidad de congelación de brócoli y zanahoria. El proceso de congelación se dividió en dos etapas, en la primera se utilizó congelación por medio de aire frío en la cámara de congelación (congelación mecánica), en la segunda etapa se aplicó congelación criogénica con bloques de hielo seco. También se analizó el efecto de la congelación criogénica-mecánica aplicando en la primera etapa el método criogénico y en la segunda parte se utilizó aire frío en la cámara de congelación. Las etapas del proceso para aplicar los tipos de congelación criogénico-mecánico y mecánico-criogénico se dividieron por medio de los siguientes intervalos de temperatura: a) primera etapa de 10 °C a -5 °C, segunda etapa de -5 °C a -20 °C, b) primera etapa de 10 °C a -10 °C, segunda etapa de -10 °C a -20 °C. Ambos tipos de congelación aportaron resultados favorables en la congelación de brócoli, sin embargo para la congelación de zanahorias solo con el tipo de congelación criogénico-mecánico se obtuvieron resultados positivos en textura, pérdida de peso y velocidad de congelación. Después de descongelar las muestras, los valores de esfuerzo normal menores a los registrados en muestras frescas, indican la pérdida de firmeza que tuvieron las muestras de zanahoria y brócoli; valores cercanos a los obtenidos en muestras frescas indican firmeza en los vegetales descongelados.

INDICE DE CONTENIDO

Introducción

Capítulo I. ANTECEDENTES	1
1.1 Generalidades de la materia prima	1
1.1.1 Zanahoria	1
1.1.2 Valor nutricional de zanahoria	3
1.1.3 Variedad de zanahoria	3
1.1.4 Brócoli	4
1.1.5 Valor nutricional de brócoli	5
1.1.6 Variedades de brócoli	5
1.2 Escaldado	5
1.3 Congelación	7
1.3.1 Crecimiento de los cristales	9
1.3.2 Tiempo de congelación	10
1.3.3 Velocidad de congelación	12
1.3.4 Recristalización	14
1.4 Métodos de congelación	16
1.4.1 Sistemas de contacto con aire	16
1.4.2 Sistemas de contacto con superficie fría	18
1.4.3 Congelación por inmersión	19
1.4.4 Congelación criogénica	20
1.4.5 Congelación mixta (criogénica-mecánica)	23
1.5 Descongelación	27
1.5.1 Métodos de calentamiento superficial	28
1.5.2 Métodos de descongelación por calentamiento interno	30
1.6 Efectos causados por la congelación en los alimentos	32
1.7 Deformación de textura en los alimentos	34
1.7.1 Análisis de textura en alimentos sólidos	36

1.8 Termopares	37
1.8.1 Construcción de termopares	39
1.8.2 Calibración de termopares bimetálicos	40
1.8.3 Validación	40
1.8.4 Validación de termopares	42
Capítulo II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	45
2.1 Objetivos	45
2.1.1 Objetivo general	45
2.1.2 Objetivos particulares	45
2.2 Variables	46
2.2.1 Selección y justificación de variables	46
2.2.2 Definición de variables y niveles de variación	47
2.3 Actividades previas	48
2.3.1 Validación de termopares	48
2.3.2 Caracterización de la cámara de congelación	51
2.3.3 Caracterización del bióxido de carbono	51
2.4 Etapa experimental	52
2.5 Escaldado de las muestras	54
2.6 Congelación de las muestras	55
2.7 Descongelación	56
2.8 Ensayo de penetración y pérdida de peso	57
2.9 Diseño experimental	58
Capítulo III. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
3.1 Ensayo de penetración	59
3.2 Pérdida de peso en vegetales	64
3.3 Velocidad de congelación	66
3.4 Congelación.	70

CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80

Apéndice 1. Validación de termopares.

Índice de Figuras

Figura 1.	Corte longitudinal de la zanahoria	2
Figura 2.	Categoría de zanahorias	3
Figura 3.	Morfología del brócoli	4
Figura 4.	Congelación	8
Figura 5.	Velocidad de congelación	13
Figura 6.	Recristalización isomásica	14
Figura 7.	Recristalización por presión	15
Figura 8.	Recristalización migratoria	16
Figura 9.	Efectos de la velocidad de congelación en la textura de los alimentos	33
Figura 10.	Penetrómetros	37
Figura 11.	Cámara de congelación	52
Figura 12.	Brócoli y zanahoria con termopar	53
Figura 13.	Selector de termopares manual y lector de temperatura	53
Figura 14.	Diseño factorial 2^3	58
Figura 15.	Comparación de resultados de esfuerzo normal en zanahoria	60
Figura 16.	Comparación de resultados de esfuerzo normal en brócoli	60
Figura 17.	Interacción entre tipo de vegetal, tipo de congelación y temperaturas de congelación para los resultados de esfuerzo normal	62
Figura 18.	Efectos principales de las temperaturas de congelación, el tipo de congelación y el tipo de vegetal.	62
Figura 19.	Interacción entre métodos de congelación y tipo de vegetal	64
Figura 20.	Interacción entre temperaturas de congelación y tipo de congelación sobre la pérdida de peso en zanahoria	65
Figura 21.	Interacción en el aumento de peso en brócoli.	66
Figura 22.	Interacción entre tipo de congelación, temperaturas de congelación y tipo de vegetal con efectos en la velocidad de congelación	67
Figura 23.	Efectos principales de los factores sobre la velocidad de congelación	67
Figura 24.	Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C en zanahoria	70

Figura 25.	Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C en zanahoria.	71
Figura 26.	Temperaturas de congelación criogénica-mecánica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C en zanahoria.	72
Figura 27.	Temperaturas de congelación criogénica-mecánica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C en zanahoria.	73
Figura 28.	Temperaturas de congelación mecánica de zanahoria	73
Figura 29.	Temperaturas de congelación criogénica de zanahoria	74
Figura 30.	Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperatura de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C en brócoli.	75
Figura 31.	Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C en brócoli.	75
Figura 32.	Temperaturas de congelación criogénica-mecánica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C para brócoli	76
Figura 33.	Temperaturas de congelación criogénico-mecánico con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C en brócoli	77
Figura 34.	Temperaturas de congelación mecánica de brócoli	78
Figura 35.	Temperaturas de congelación criogénica de brócoli	78

Índice de Tablas

Tabla 1.	Valor nutricional de la zanahoria	3
Tabla 2.	Valor nutricional de brócoli	5
Tabla 3.	Coefficientes P y R	12
Tabla 4.	Propiedades de algunas sustancias criogénicas	21
Tabla 5.	Clasificación de termopares	38
Tabla 6.	Definición de factores y variables	48
Tabla 7.	Factores experimentales	58
Tabla 8.	ANOVA para los resultados de esfuerzo normal	63
Tabla 9.	Niveles de variación	63
Tabla 10.	ANOVA para los resultados de velocidad de congelación	68
Tabla 11.	Resultados de medias de velocidad de congelación (°C/min)	69
Tabla 12.	Resultados de velocidad de congelación mecánica y criogénica (°C/min)	69

INTRODUCCIÓN

Sin duda el área de la congelación de hortalizas ha presentado un importante crecimiento en las últimas décadas, pues representa un excelente método para mantener casi inalteradas por un tiempo prolongado las características originales de alimentos perecederos (Gamiño y col., 2006).

La velocidad de congelación y la temperatura de congelación, son dos variables de suma importancia en el proceso de congelación de alimentos. En los alimentos se puede retirar calor en dos modalidades, la refrigeración y la congelación. En la refrigeración el alimento debe mantenerse entre $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la congelación, la temperatura del alimento debe descender hasta $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para descender la temperatura a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y por debajo de ésta se necesita disponer de un medio a temperatura inferior. Los métodos que se utilizan para la eliminación de calor en los vegetales pueden ser frío mecánico o criogénico (Aguado, 2002).

La criogenia se define como la ciencia dedicada a la producción de bajas temperaturas (en general por debajo de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$). El CO_2 es un gas en condiciones normales ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura y 1 kg/cm^2 de presión). Una de sus presentaciones comerciales es hielo seco o nieve carbónica a una temperatura de $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a la presión atmosférica, teniendo entonces una alta capacidad frigorífica (150 kcal/kg) (Gamiño y col. 2006).

Los daños ocasionados en la zanahoria y el brócoli que se destinan a la congelación son provocados por un mal método de congelación y un mal desarrollo de la cadena de frío en los productos congelados. Cuando el producto se descongela presenta daños texturales y exudación que puede ser factor importante de contaminación cruzada.

El método de congelación mixto criogénico-mecánico permite que durante la primera etapa del proceso de congelación, la transferencia de calor sea rápida para conseguir que el agua del alimento se congele, evitando que salga de las células para formar grandes cristales de hielo y romper las estructuras celulares. Es necesario asegurar que

durante la etapa de nucleación y crecimiento de cristales se tenga una velocidad rápida de congelación para obtener cristales de hielo con estructura uniforme y así no dañar la textura de los alimentos congelados.

Durante la segunda etapa del método de congelación mixto mecánico-criogénico la transferencia de calor aumenta debido a la diferencia entre la temperatura del medio criogénico y la del alimento. De este modo se puede asegurar que en el interior del alimento se consiga la temperatura final de congelación y se evita que los cristales formados en la primera etapa mecánica de congelación sigan creciendo debido a la baja velocidad del proceso.

El método criogénico-mecánico se ha implementando ya en la congelación de fresa. Empleando las temperaturas de 7 °C y -12 °C como temperaturas intermedias entre ambos métodos de congelación se observó una reducción en tiempo de congelación comparado con la congelación mecánica. Se recomienda este tipo de congelación para fresa ya que conserva la calidad del producto tanto en apariencia como en valor nutritivo (Gamiño y col., 2006).

La congelación de vegetales como brócoli y zanahoria es muy importante ya que grandes cantidades producidas de estos cultivos en México son destinadas a la congelación. En ocasiones los métodos de congelación no son los más adecuados dependiendo del tipo de vegetal a congelar o del tipo de equipos que se tengan para congelar, por ese motivo en este trabajo se utilizaron los tipos de congelaron criogénico-mecánico y mecánico-criogénico para congelar brócoli y zanahoria. Una vez congelados los vegetales se descongelaron para comparar la calidad de cada uno por medio del ensayo de penetración, velocidad de congelación y pérdida de peso por exudación.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Generalidades de la materia prima

El brócoli y la zanahoria son vegetales que actualmente se destinan en grandes cantidades para la distribución en fresco y para ser congelados, lo que permite exportar este tipo de vegetales y mantenerlos almacenados por más tiempo. Las diferencias más importantes entre ambos vegetales a considerar es el contenido de agua y la estructura física de cada uno: la zanahoria es una hortaliza aprovechable por su raíz, mientras que el brócoli está constituido por tallos carnosos e inflorescencia.

1.1.1. Zanahoria

Pertenece a la familia de las Apiáceas (Umbelíferas). Su nombre científico es *Daucus carota L*, es una raíz vegetal, tradicionalmente naranja con una textura leñosa (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2011).

Hortaliza que puede comerse cruda y posee múltiples beneficios, alimento primordial del bebe, la zanahoria perdura en nuestra civilización moderna y se mantiene en los primeros puestos de las hortalizas de gran consumo. Cabe señalar que la zanahoria presenta un elevado contenido en carotenoides, en particular β -caroteno. Esta provitamina A, además de contribuir al típico color naranja, protege de problemas de la visión y mantiene en buen estado los tejidos del organismo, especialmente la piel y los bronquios (Tirilly y Bourgeois, 2002).

Hoy por razones de costo, labor e higiene, las empresas dedicadas a la fabricación de alimentos procesados, prefieren comprar frutas y verduras ya pelados y posiblemente también rebanados o picados, esto es mínimamente procesados. El procesamiento de frutas

y verduras busca mantener el producto fresco, sin pérdida de valor nutricional y con una vida útil suficiente para su comercialización (Uquiche, 2002).

La parte de la zanahoria que consumimos es la raíz principal pivotante del sistema radical de la planta. Es posible diferenciar en el interior de la raíz madura varias partes según Tirilly y Bourgeois (2002):

- Una zona muy delgada en el exterior, epidermis de la raíz, llamada “peridermis”.
- Una zona intermedia constituida por el floema, denominada “carne de la zanahoria”;
- Un delgado anillo de capas generatrices que constituyen el cambium;
- Una zona central que corresponde al xilema de la raíz.

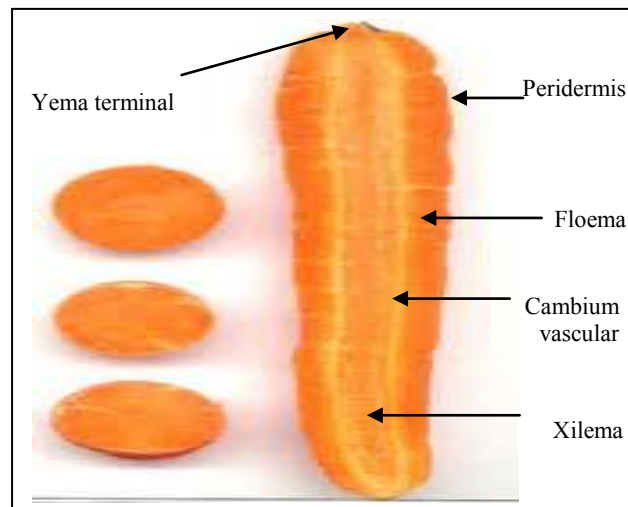


Figura 1. Corte longitudinal de la zanahoria (Tirilly y Bourgeois, 2002).

La zanahoria presenta un tallo corto en el que se forman las flores, el sistema radicular tiene la función almacenadora y también presenta numerosas raíces secundarias que sirven como órganos de absorción. Las zanahorias más aceptadas son las que presentan gran proporción de corteza exterior (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2011).

1.1.2 Valor nutricional de la zanahoria.

La siguiente tabla presenta el valor nutricional de la zanahoria. El contenido de agua es importante en los alimentos a congelar y representa la mayor parte de la constitución de la zanahoria,

Tabla 1. Valor nutricional de la zanahoria* (Fachmann, 1991)

Energía (kcal.)	25
Agua (g)	88,2
Proteína (g)	1,0
Grasa (g)	0,2
Hidratos de carbono (g)	4,6
Ácidos orgánicos (g)	0,3
Fibra (g)	3,4
Sales minerales (g)	0,9

*Nota: Por 100 gramos de producto comestible.

1.1.3. Variedad de zanahoria

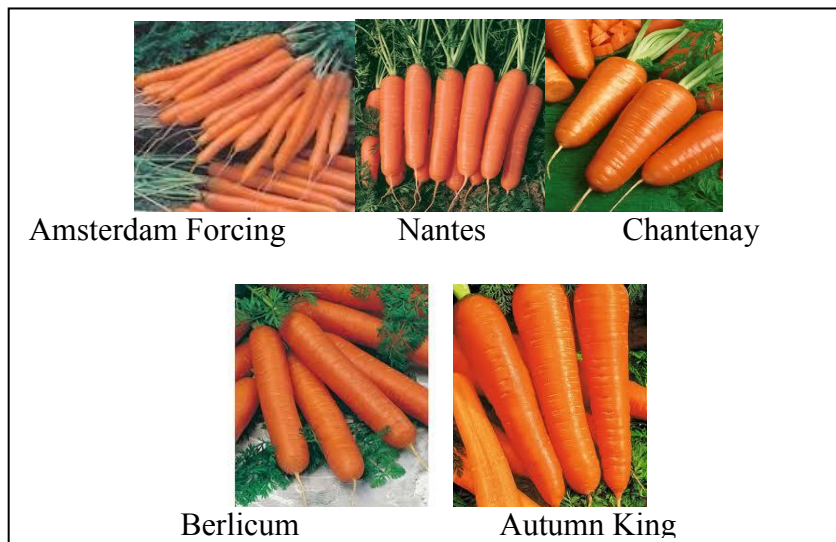


Figura 2. Categoría de zanahorias (Arthey, 1992).

Las diversas variedades de zanahoria se destinan para usos diferentes y pueden ser clasificadas en términos generales por la forma de su raíz. Las variedades de zanahorias pertenecen a una de las siguientes cinco categorías: *Ámsterdam Forcing*, *Nantes*, *Chantenay*, *Berlicum* y *Autumn King* (Arthey, 1992). Algunas peculiaridades que diferencian las variedades de zanahoria son: el color, la forma, la longitud y el grosor de la raíz.

1.1.4 Brócoli

El brócoli, brécol o bróculi, del latín *brachium* (brazo) pertenece a la familia de las *Brasicáceas*, antes llamadas *Crucíferas*, su nombre científico es *Brassica oleracea*, variedad *italica* (Tirilly y Bourgeois, 2002).

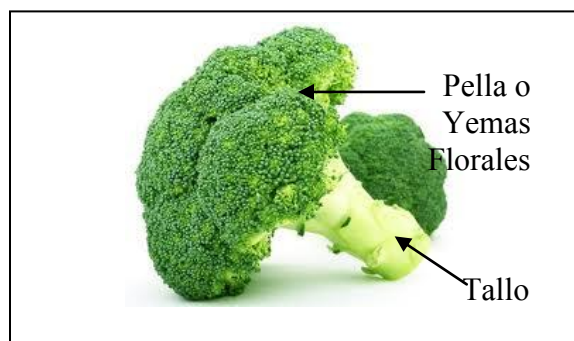


Figura 3. Morfología del brócoli (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2011).

La planta es recta, tiene de 60 a 90 cm de altura y termina en una masa de flores de color verde llamada pella o yemas florales, que pueden alcanzar un diámetro hasta de 35 cm, y están sostenidas por un tallo como lo muestra la figura 3. Las flores son de color amarillo y tienen cuatro pétalos en forma de cruz. El fruto es de color verde cenizo que mide en promedio de 3 cm a 4 cm., contiene las semillas, mismas que tienen forma de munición y miden de 2 mm a 3 mm de diámetro (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2011).

1.1.5. Valor nutricional de brócoli

Al igual que el caso de la zanahoria, el brócoli contiene un alto nivel de agua en su composición, por ello es importante asegurar una velocidad de congelación rápida de manera que el agua dentro de las células alcance una rápida congelación sin dañar la textura.

Tabla 2. Valor nutricional de brócoli*(Fachmann, 1991)

Agua (g)	89,7
Proteínas (g)	3,3
Grasa (g)	0,2
Hidratos de carbono (g)	2,5
Ácidos orgánicos (g)	0,3
Fibra (g)	3,0
Sales minerales	1,1

*Nota: Por 100 gramos de producto comestible.

1.1.6. Variedades de brócoli

Según el ciclo de formación de la pella, se dividen las variedades en tempranas, de media estación y tardías.

- a) Precoces o tempranas. Se recolectan en menos de 90 días tras de su siembra.
- b) Cultivares intermedios o de media estación. Se cosechan entre 90 y 110 días tras su siembra.
- c) Cultivares tardíos. Tardan más 110 días en lograr un desarrollo adecuado.

1.2. Escaldado

La mayor parte de las verduras y algunas frutas se someten a un proceso de escaldado antes de las subsiguientes operaciones: como el enlatado, la congelación o la deshidratación. El escaldado es un pre tratamiento térmico suave, pero no es un método de

conservación, normalmente se aplica entre la preparación y su subsecuente procesado. Consiste en el calentamiento rápido del producto hasta una temperatura predeterminada, su permanencia en la temperatura seleccionada durante el tiempo adecuado y a continuación un enfriamiento rápido o su paso inmediato a la siguiente fase del proceso. El principal objetivo del escaldado suele ser la inactivación de enzimas que pueden provocar la reducción de la calidad del producto procesado. Por ejemplo en los alimentos congelados, la alteración podría tener lugar durante cualquier retraso de la congelación, durante la conservación en congelación o durante la posterior descongelación (Brennan, 2008).

Este tratamiento térmico también conocido como blanqueo, persigue la inhibición de la actividad enzimática residual de ciertas frutas y verduras que podrían dar lugar a la alteración nutritiva o sensorial del producto. El tratamiento es moderado entre 70 y 100 °C, con agua o con vapor de agua. El escaldado con agua está contraindicado para conservación por congelación, ya que puede dañar los tejidos por cristalización debido al agua que no alcanza a escurrir del alimento y durante la congelación se cristaliza ocasionando daños texturales al formar grandes cristales de hielo (Aguado, 2002).

El escaldado cumple con siguientes objetivos:

- Inactivación de las enzimas de tipo vegetal: catalasa, carbohidrasas, α -amilasa y β -amilasa, polifenoloxidasas
- Ablandamiento del producto
- Eliminación parcial de los gases intercelulares
- Fijación y acentuación del color natural
- Reducción parcial de los microorganismos presentes en el producto.
- Desarrollo del sabor característico

Para satisfacer las necesidades observadas en los consumidores sobre la firmeza del producto antes de ser consumido y después de los procesos a los que se somete, se conocen algunas técnicas para realizar el escaldado que ocasionan menor pérdida de firmeza de los tejidos, como el escaldado a temperaturas altas por tiempos cortos, escaldado con

microondas-vapor, radiaciones infrarrojas, vapor y radiofrecuencia, escaldado individual, escaldado por etapas y escaldado a temperaturas bajas con tiempos largos (Aguilar, 1999).

Un escalado corto a temperatura elevada es preferible a un escaldado más largo a temperatura más baja, porque reduce las modificaciones de color (degradación de clorofilas) y las pérdidas de nutrientes solubles (tales como sales, azúcares y vitaminas) (Instituto Internacional del Frío, 1990).

Arthey (1992) recomienda para el escaldado de brócoli y zanahoria cortados en trozos pequeños un tiempo de escaldado de 2 a 8 minutos a 98 °C con vapor de agua.

1.3. Congelación

La congelación es un proceso que disminuye la temperatura de los alimentos por debajo de su punto de congelación y debe su poder conservador a dos efectos:

- ❖ Transformación del agua líquida, contenida en el alimento, en hielo.
- ❖ Efecto térmico con enfriamiento de los productos tratados hasta zonas de temperatura en las que las actividades biológicas están muy reducidas (Mafart, 1994).

La congelación provoca la transformación del agua contenida en las frutas y hortalizas en cristales de hielo. Es preciso que los cristales sean pequeños, en este caso se reducen las pérdidas de líquido celular durante la descongelación. La máxima cristalización se presenta entre -5 y -7 °C, cuanto más rápido el producto alcance estas temperaturas, los cristales de hielo formados serán más pequeños (Manuales para la Educación Agropecuaria, 1983).

En el proceso de congelación se presenta una caída en la temperatura inicial del producto, representada con la letra A en la figura 4, hasta que llega a su punto de congelación inicial representado en la letra B, durante esta etapa se retira el calor sensible del alimento. El subenfriamiento continúa hasta el punto S, donde empieza la nucleación.

En esta etapa la liberación de calor latente determina que la temperatura ascienda hasta al punto inicial de congelación representado como la letra C. En ésta etapa el calor retirado ocasiona un cambio de fase del agua en estado líquido a sólido manteniendo la temperatura estable sin disminuir significativamente.

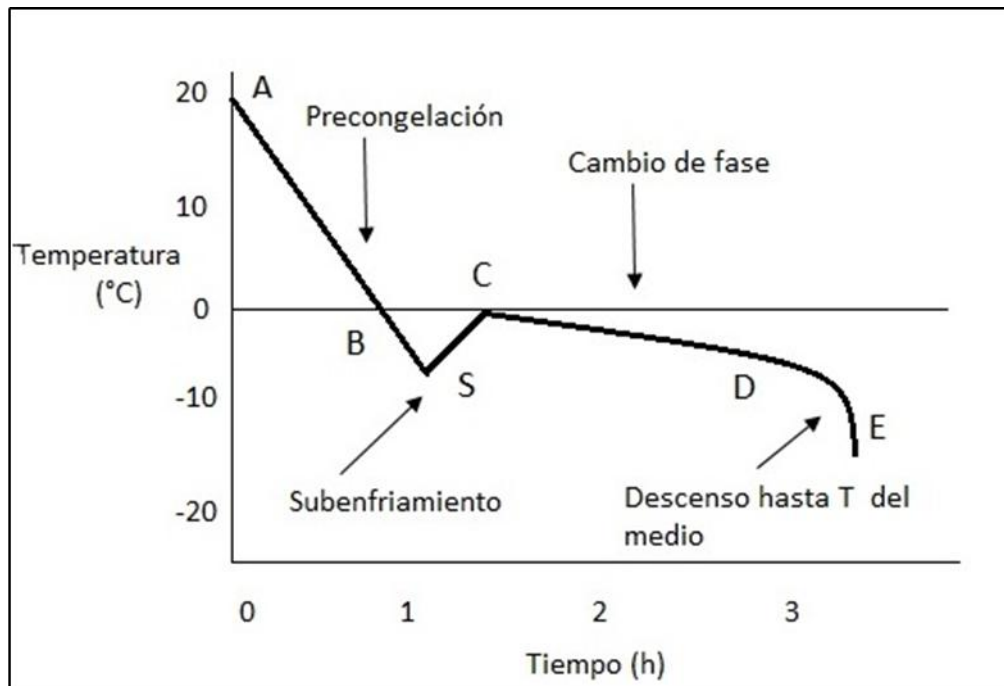


Figura 4. Congelación (Ramaswamy y Marcotte, 2006).

Durante el proceso de congelación se presentan tres distintas etapas, como se observan en la figura 4, se definen como: periodo de precongelación (AB), periodo de cambio de fase o congelación (CD) y periodo de enfriamiento para almacenamiento (DE) en el cual el alimento ya congelado disminuye su temperatura para alcanzar la del medio. Existe un comportamiento llamado subenfriamiento (S), en el cual la temperatura del producto desciende por debajo del punto inicial de congelación sin presentar cambio de fase de líquido a sólido, con la previa reducción de la temperatura en el subenfriamiento se inicia la nucleación. Después de ésta etapa la temperatura se incrementa hasta llegar al punto inicial de congelación, letra C, para continuar con la congelación. El proceso de cristalización del agua contenida en los alimentos consiste en dos fases: nucleación y crecimiento de los cristales. Ambos procesos pueden ocurrir simultáneamente después de

presentarse la nucleación inicial, esto depende de la temperatura y la velocidad de congelación (Ramaswamy y Marcotte, 2006).

Para que un cristal de hielo pueda formarse debe existir primero un núcleo de moléculas de agua ordenadas en una diminuta partícula que sirve como el sitio activo para el crecimiento de cristales, es decir, debe producirse primero la nucleación. Existen dos tipos de nucleación: nucleación homogénea (orientación uniforme de moléculas de agua) y la heterogénea (la formación del núcleo sobre partículas en suspensión o sobre la pared celular). La nucleación heterogénea ocurre en los alimentos y se produce en la etapa de subenfriamiento (Fellows, 1994).

1.3.1. Crecimiento de los cristales

A diferencia de la nucleación, el crecimiento de cristales puede iniciarse a temperaturas justo por debajo del punto de congelación. El crecimiento de los cristales se produce cuando el número de moléculas de agua, capaces de difundirse a lo largo de la interface y de situarse orientadas en una posición de crecimiento del cristal, es mayor que las que se separan del mismo. El mecanismo y velocidad de crecimiento de los cristales dependen de la morfología de su superficie. Mientras la superficie sea rugosa y con muchos pliegues el crecimiento será continuo, pero cuando se vaya alisando se reducirá la velocidad de crecimiento. En el caso de los tejidos vegetales, durante la congelación lenta el hielo se formará en los espacios extracelulares, resultando de esta forma que las células se vean rodeadas de una matriz rica en hielo y por lo tanto, de alta concentración en solutos y a baja temperatura. Esto crea un gradiente osmótico entre el interior de la célula y la matriz extracelular que permitirá la transferencia de agua desde dicha célula hacia la matriz. Esta agua que ha cambiado de posición se congelará en el exterior de la célula incrementando de tamaño a los cristales existentes y produciendo a la vez una deshidratación extensiva de las células, que presentaran una apariencia arrugada. Además cuando la transferencia de agua por ósmosis es alta las paredes celulares pueden llegar a rasgarse. Por el contrario, si se consigue una eliminación de calor rápida, en comparación con la pérdida de agua por

medio de ósmosis, el agua se congelará dentro y fuera de las células formando pequeños cristales, obteniéndose así un producto congelado de mejor calidad (Casp y Abril, 2003).

1.3.2. Tiempo de congelación

El tiempo de congelación es un parámetro básico para el diseño de los sistemas de congelación y determina las condiciones en las que el alimento se expone a este proceso para alcanzar la temperatura final deseada y la calidad buscada. Generalmente se entiende como tiempo de congelación el requerido para que el producto pase de su temperatura inicial hasta la que se haya establecido como final, midiendo esta temperatura en el punto dónde el enfriamiento se produce más lentamente dentro del alimento (Casp y Abril, 2003).

En la práctica son muchos los factores que influyen en el tiempo de congelación. Entre los más importantes figuran las dimensiones y formas del producto, la temperatura inicial y la final, la temperatura del foco frío, el coeficiente superficial de transmisión de calor del producto al medio refrigerante y la conductividad del producto. Las propiedades físicas del producto en función de la temperatura: calor específico, calor latente, conductividad y densidad. Si el producto a congelar es de tamaño reducido el factor que controla el proceso es el coeficiente superficial de transmisión de calor, mientras que en grandes tamaños el control lo ejerce la conductividad (Aguado, 2002).

No es fácil definir con exactitud el tiempo de congelación. El tiempo de congelación efectivo es el tiempo necesario para que disminuya la temperatura de un alimento desde un valor inicial hasta una temperatura final predeterminada en el centro térmico. Sharma (2003) define el tiempo de congelación nominal al tiempo que transcurre entre el momento en que la superficie del alimento se acerca a 0 °C y el momento en que el centro térmico se acerca a 10 °C por debajo de su punto inicial de congelación.

El modelo de Plank es uno de los primeros modelos desarrollados para la predicción del tiempo de congelación. La desventaja de éste modelo es que sólo estima el tiempo para el periodo de cambio de fase. El International Institute of Refrigeration (IIR) ha realizado

una modificación para estimar el tiempo de congelación considerando la etapa de pre-congelación, cambio de fase y temperado.

Se debe calcular la cantidad total de calor que será removido por medio de la siguiente ecuación (Ramaswamy y Marcotte, 2006):

$$\Delta H = (T_i - T_f)C_{pu} + L + (T_f - T_c)C_{pf} \quad (1)$$

ΔH = Cantidad total de calor que será removido (kJ/kg)

C_{pu} = Calor específico del alimento sin congelar (kJ/kg °C)

C_{pf} = Calor específico del alimento congelado (kJ/kg °C)

$L = L_{H_2O} \chi_m$ Calor latente del agua contenida en el alimento (kJ/kg)

T_i = Temperatura inicial del producto (°C)

T_f = Temperatura final de congelación (°C)

T_c = Temperatura del punto inicial de congelación (°C)

La ecuación de Plank es la siguiente:

$$t_f = \left[\frac{\rho_f L}{(T_c - T_m)} \right] \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{K_f} \right) \quad (2)$$

t_f = tiempo de congelación (s, min, h)

ρ_f = densidad del producto congelado(kg.m⁻³)

L = calor latente de fusión (J.kg⁻¹)

T_c = temperatura de congelación del producto (°C)

T_m = temperatura del medio de congelación (°C)

d = dimensión característica del producto (m)

h = coeficiente de transferencia de calor por convección (W.m⁻²°C⁻¹)

k_f = conductividad térmica del producto congelado (W.m⁻¹°C⁻¹)

P y R = coeficientes que dependen de la forma del producto que toman los valores siguientes:

Tabla 3. Coeficientes P y R (Ramaswamy y Marcotte, 2006)

Forma:	P	R
Lámina infinita	0,5	0,125
Cilindro Infinito	0,25	0,0625
Esfera	0,167	0,0416

La ecuación anterior no puede predecir los periodos de pre-congelación y descenso de la temperatura hasta tener la misma temperatura del medio. La modificación hecha por el Internacional Instituto de Refrigeración (IIR) se basa en sustituir L , calor latente en la ecuación de Plank, por el total de la carga de calor ΔH (Ramaswamy y Marcotte, 2006).

Sin embargo esta ecuación se usa frecuentemente ya que ofrece una rápida estimación del tiempo de congelación. Es útil para comparar tiempos de congelación para diferentes productos en el mismo proceso, pero no es bueno para comparar procesos o efectos de ajustes de parámetros externos en la congelación como la velocidad del aire o la temperatura (Pearson, 2009).

1.3.3. Velocidad de congelación

Los distintos métodos de eliminación del calor determinarán distintas velocidades en la extracción de calor. La eliminación rápida de calor permite que se produzca un pre-enfriamiento rápido, y la nucleación se produce en muchos centros en la estructura de los vegetales, formándose pequeños cristales de hielo. Una eliminación lenta de calor determina una pre-congelación lenta, lo que origina un reducido número de núcleos y determina que se formen menos cristales de hielo y de mayor tamaño. La velocidad de propagación del hielo es uno de los factores que son afectados de forma importante por la velocidad de eliminación de calor que se da en la etapa de pre-congelación (Arthey, 1992).

El concepto más utilizado de velocidad de congelación viene expresado por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{t_i - t_f}{\theta} \quad (3)$$

V = velocidad de congelación (°C/s.)

t_i = temperatura inicial del alimento al entrar en contacto con el medio refrigerante (°C).

t_f = la temperatura final del alimento (°C).

θ = tiempo en que tarda el centro térmico del alimento en pasar de la temperatura inicial a la final (s).

La figura 5 muestra las gráficas del comportamiento para velocidad lenta de congelación y velocidad rápida de congelación. .

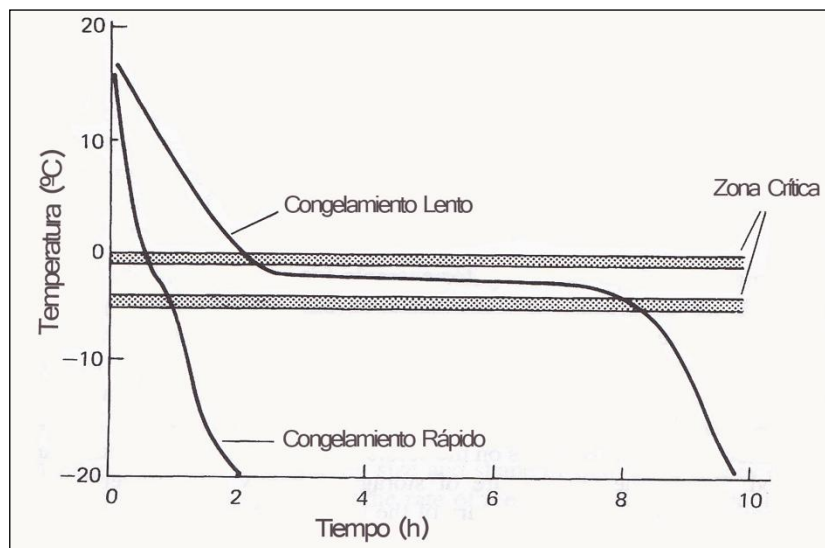


Figura 5. Velocidad de congelación (Rosenthal, 2001).

Valores de velocidad superiores a 5 °C/min suponen una congelación rápida, valores inferiores a 1 °C/min una congelación lenta y entre ambos valores se dan situaciones intermedias, siendo todas aprovechables según los alimentos y los fines de la

congelación. En base a la velocidad de la transmisión de calor las curvas de congelación tendrán distinta pendiente. En las curvas de congelación se delimita una zona llamada crítica entre la temperatura de 0 °C a -5 °C durante la cual se forma todo el hielo que va a cristalizar en la operación (Aguado, 2002).

1.3.4 Recristalización

Los cambios físicos que se producen en los cristales de hielo, como por ejemplo: cambios de forma, tamaño y orientación, conocidos como recristalización, son responsables de gran parte de la pérdida de calidad de los alimentos congelados (Fellows, 1994).

a) *Recristalización isomásica.* Éste tipo de recristalización se da cuando un cristal tiene una forma que presenta una elevada relación superficie–masa y se establece un fenómeno natural que tiende a disminuirla, conservando la masa inicial. En la figura 6 se ha representado la secuencia de disminución de energía libre (F). Las moléculas de agua se difunden dentro del mismo cristal y éste pasa a una forma con relieves menos pronunciados. Cuando este movimiento ocurre entre los intersticios celulares el cambio puede dañar ocasionalmente una membrana celular (Aguado, 2002).

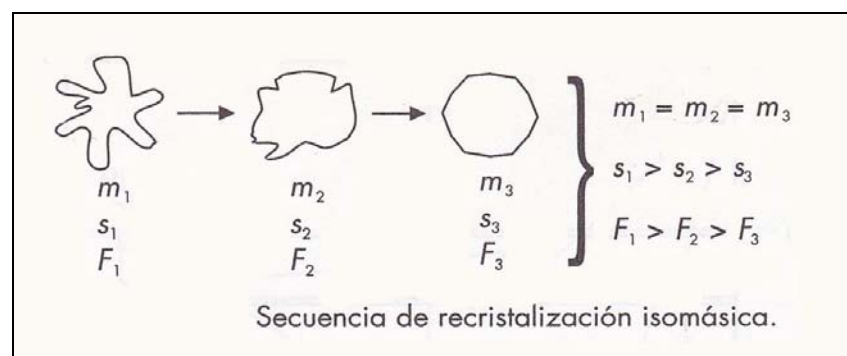


Figura 6. Recristalización isomásica dónde F es energía libre, m es masa, s es superficie (Aguado, 2002).

- b) *Recristalización acretiva*. Se produce cuando dos cristales que se encuentran en contacto se unen formando un cristal de mayor tamaño, con lo que el número total de cristales en el alimento se reduce (Fellows, 1994), también llamada recristalización por contacto.
- c) *Recristalización por presión*. Si se aplica una fuerza a un conjunto de cristales, el cristal cuyo plano basal está perpendicular a la dirección de la fuerza tiende a crecer a expensas de otros. En la siguiente figura la fuerza F haría crecer al cristal 1 a costa de las moléculas de los cristales 2 y 3 (Aguado, 2002).

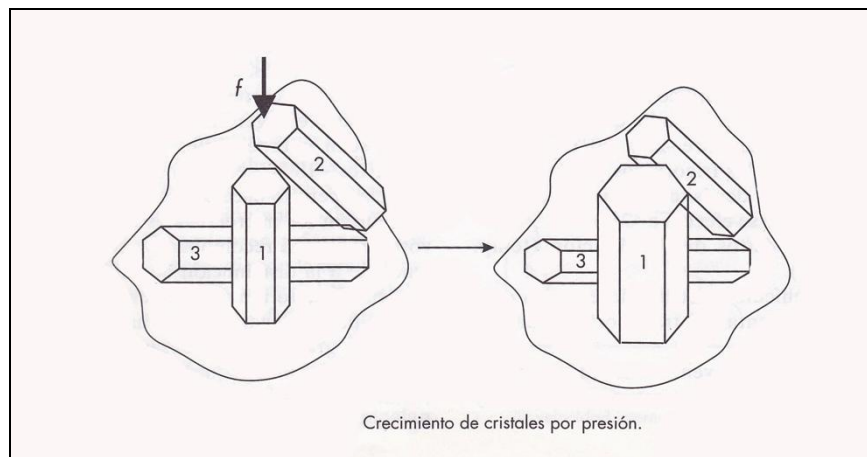


Figura 7. Recristalización por presión (Aguado, 2002).

- d) *Recristalización migratoria*. Se produce por incremento del tamaño de cristales más grandes a expensas de los más pequeños. Como consecuencia el número global de cristales descende y su tamaño medio aumenta. Nótese el cambio del tamaño en algunos cristales en la figura 8 siguiendo la secuencia de (a), (b) y (c). La recristalización migratoria tiene lugar principalmente como consecuencia de: (a) fluctuaciones en la temperatura de almacenamiento, cuando el calor penetra en un congelador la superficie del alimento más próxima se calienta ligeramente; el calor hace que los cristales de hielo se fundan parcialmente, los cristales grandes se hacen pequeños y los pequeños desaparecen (Fellows, 1994).

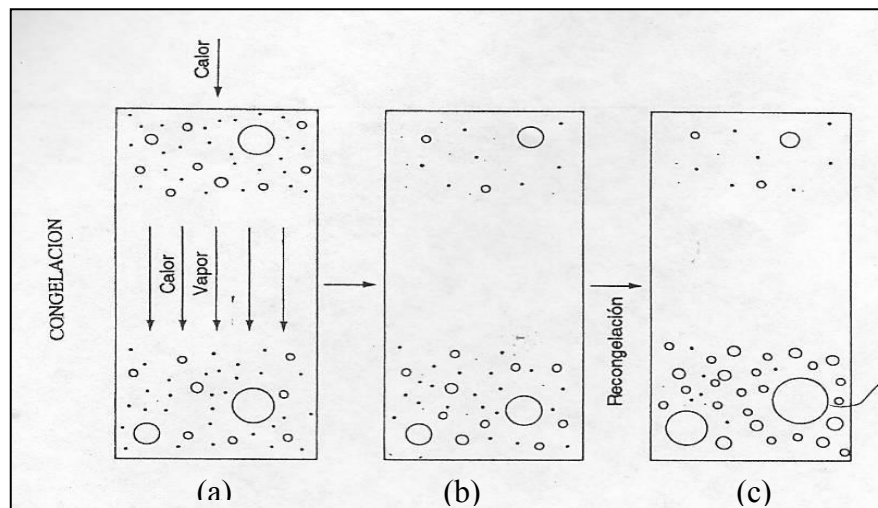


Figura 8. Recristalización migratoria (Aguado, 2002).

1.4 Métodos de congelación

Los sistemas de congelación industrial pueden dividirse en cuatro categorías principales: (a) sistemas de contacto con aire, (b) sistemas de contacto con superficie fría, (c) sistema de contacto por inmersión o por aspersión, (d) congelación criogénica.

1.4.1 Sistemas de contacto con aire

En este tipo de sistemas el aire fluye a través del alimento absorbiendo el calor del mismo. Dependiendo de la velocidad y la temperatura del aire, estos sistemas pueden utilizarse tanto para congelación como refrigeración o almacenamiento en frío. Normalmente se utiliza la forma de túnel de enfriamiento en donde el alimento se coloca sobre una banda transportadora que recorre la cámara fría. El aire forzado que circula por el túnel pasa a través del alimento y provoca la transferencia de calor. A mayores velocidades de aire se consiguen mayores velocidades de transferencia de calor. Cuando se trata de productos granulares o partidos en pequeños trozos, se puede utilizar una alta velocidad del aire para fluidizar el producto y, en consecuencia, aumentar la velocidad del enfriamiento (Brennan, 2008).

El aire frío también puede utilizarse a varias velocidades que van desde el aire de la congelación “lenta” en las cámaras de congelación hasta las corrientes intensas de aire a alta velocidad empleadas en el congelador de túnel. La velocidad del aire tiene la función de subdividir y mover las partículas del material que se está congelando, como es el caso de la congelación en un lecho fluidizado (Potter, 1973).

Entre los congeladores por aire se encuentran congeladores de cajón, en éstos el producto se congela por contacto con aire a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, que circula por convección natural. Este tipo de congeladores no se emplean industrialmente ya que tiene velocidades de congelación bajas (tiempos de congelación de 3 a 72 h), además de un alto costo y afecta la calidad del producto. Se emplean para la congelación de canales y para el almacenamiento de alimentos congelados por otros métodos. Un método más ampliamente usado son los túneles de congelación, en ellos el alimento es sometido a un chorro de aire a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una velocidad de 1.5 – 6.0 m/s. Como los túneles de congelación son más compactos, la relación superficie/volumen es más favorable. El flujo de aire a través del alimento, que puede ser paralelo o perpendicular, es homogéneo en toda su masa. Los túneles de congelación se pueden utilizar de manera flexible, ya que permite congelar alimentos de diversas formas y tamaños. Su capacidad de producción es relativamente elevada 200-1,500 kg/h. Los congeladores de banda transportadora sin fin o congeladores en espiral también son túneles de congelación por chorro de aire, dentro de este tipo de túnel la banda transportadora sin fin recorre el interior del túnel de abajo hacia arriba en una trayectoria en espiral (Fellows, 1994).

En los congeladores de banda transportadora en espiral mediante ráfaga de aire, el transportador consiste en una banda flexible que forma gradas en espiral. La banda puede ir sobre carriles o ser auto-apiladora. En muchos casos en este sistema de congelación el aire es dirigido hacia abajo a través de la banda transportadora, mientras que ésta eleva el producto. Así se produce un contraflujo entre el aire y el alimento. Las temperaturas y velocidades del aire son similares a las usadas en el túnel anterior. Algunos alcanzan rendimientos de hasta 3,000 kg/h. Otro sistema por ráfaga de aire es el congelador de lecho fluidizado, este sistema no hace uso de un transportador, en su lugar emplea el principio de

la fluidificación. Aire entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pasa a gran velocidad, aproximadamente 5 m/s , a través de un lecho de $3 - 14\text{ cm}$ de trozos pequeños de hortalizas sitiadas en una cubeta con la base perforada. El producto vegetal se comporta como un líquido, con movimientos turbulentos. El espesor del lecho del producto y la velocidad del aire precisan para la fluidización, dependen del tamaño y de la forma del producto. Por ejemplo los guisantes y las zanahorias cortadas en forma de dados resultan ideales para este sistema de congelación y las pérdidas de humedad son reducidas. Los equipos que congelan rápidamente alimentos con forma de piezas individuales en un congelador de banda transportadora, espiral o de lecho fluidificado suelen ser denominados IQF (Individual Quick Freezing = congelación individual rápida) (Arthey, 1992).

Vegetales como chicharos, maíz, habas y zanahorias son normalmente congelados en un sistema IQF. Este sistema usualmente consiste en uno o dos camas de bandas transportadoras las cuales transportan el producto a través del túnel de congelación donde es agitado por una alta velocidad del aire frío (-20 a $-25\text{ }^{\circ}\text{F}$) directamente de debajo de la banda transportadora (International Institute of Ammonia Refrigeration IIAR, 1980).

1.4.2 Sistemas de contacto con superficie fría

En este tipo de equipo el alimento se coloca en contacto con una superficie fría y la diferencia de temperatura hace que se transfiera el calor desde el alimento a las placas o a la superficie fría. En los congeladores de placas lo más frecuente es que el alimento se coloque entre dos placas metálicas enfriadas y se aplique presión de las placas con objeto de asegurar que contacten con las superficies del producto a enfriar. Con este sistema se alcanzan niveles altos de coeficientes globales de transferencia de calor, por ello se utilizan normalmente en las líneas de producción de alimentos sólidos o envasados (Brennan, 2008).

Los congeladores de placas están constituidos por una serie de placas huecas dispuestas vertical y horizontalmente por las que circula el refrigerante a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas instalaciones pueden ser de funcionamiento discontinuo, semi continuo o continuo. En ellas

el alimento plano y de poco grosor, por ejemplo: filetes de pescado, taquitos de pescado o hamburguesas, se dispone en una capa única entre las placas que, mediante un sistema hidráulico, se aproximan hasta contactar con el alimentos, presionándolo suavemente. De esta forma se aumenta la superficie de contacto y por lo tanto, la velocidad de transferencia calórica. La capacidad de producción de estas instalaciones discontinuas oscila entre los 90 y 2,700 kg/h. Puede tener algunas ventajas: son relativamente baratas de funcionamiento, ocupan poco espacio, poseen un elevado coeficiente de transferencia calórica y provocan poca deshidratación. Sus principales desventajas son: requieren inversiones relativamente elevadas, y solo resultan adecuadas para productos planos de poco grosor (Fellows, 1994).

Dentro del tipo de sistemas de congelación con superficie enfriada, existen los congeladores de superficie rascada. Este tipo de congeladores se emplean para alimentos líquidos o semisólidos, por ejemplo helados (Fellows, 1994).

En el evaporador de escarcha o congeladores de superficie rascada, la congelación tiene lugar en contacto con la superficie interna del cilindro exterior hueco por el que circula el refrigerante, constituyendo el evaporador de la maquina frigorífica. El congelador va aumentando de espesor hasta que es barrido por las cuchillas rascadoras que lo conducen a la salida del producto congelado. Algo importante a considerar es que el proceso de congelación es lento y el rotor gira a pocas revoluciones por minuto (Aguado, 2002).

1.4.3 Congelación por inmersión

En este método el líquido enfriado fluye de forma rápida a través del producto, con lo que el enfriamiento es muy rápido. Como líquidos de enfriamiento se utilizan agua, salmueras (soluciones de sal o azúcar) y propilenglicol. El alimento normalmente empaquetado, se pone en contacto con el líquido fluyente de varias maneras: por inmersión o por pulverización. En el sistema de pulverización, el líquido enfriado se esprea sobre el alimento con lo que se consigue una eficiente transferencia de calor (Brennan, 2008).

Las mezclas frigoríficas o líquidos pre enfriados, tienen puntos de congelación por debajo de 0 °C, por ejemplo: la salmuera -21 °C, el propilenglicol -45 °C, disolución de sacarosa -15 °C. Estos fluidos funcionan como vehículo de transporte del calor que retiran del alimento al evaporador de una máquina frigorífica. Este método supera al de placas por el contacto directo entre el producto y la mezcla frigorífica, favoreciendo la transferencia de calor, además mantiene la calidad en alimentos sensibles a la oxidación y a la deshidratación. Existen varios modelos variados pero fundamentalmente consisten en una cinta sin fin que transporta el alimento en contracorriente con la mezcla frigorífica en un depósito longitudinal (Aguado, 2002).

1.4.4. Congelación criogénica

En estos sistemas el refrigerante cambia de estado al absorber el calor del producto a congelar. Este compuesto criogénico entra en contacto con el alimento captando rápidamente de él el calor latente de vaporización o sublimación, congelando inmediatamente el alimento. Existen sistemas de congelación en los que el medio refrigerante es un sólido sublimante, por ejemplo dióxido de carbono, o un líquido en ebullición como el nitrógeno líquido y el anhídrido carbónico líquido. La capacidad de congelación de estas instalaciones es de 500 a 9,000 kg/h. Sus principales desventajas son el riesgo de captación por el alimento de una excesiva cantidad de refrigerante. Tanto el nitrógeno líquido como el anhídrido carbónico (CO₂, bióxido de carbono), son incoloros, inodoros e inertes (Fellows, 1994).

En los equipos el contacto puede ser por aspersión del gas licuado sobre el producto ó por inmersión total del producto en el líquido. En el caso de los equipos por aspersión el nitrógeno líquido (N₂) procedente de un tanque de almacenamiento se rocía sobre el producto que entra al túnel transportado en una banda. El nitrógeno líquido tiene punto de ebullición de -196 °C, a esa temperatura se convierte en gas tomando el calor latente del alimento que se congela a una gran velocidad cuando ambos entran en contacto. Aproximadamente un 50% de la capacidad congeladora del nitrógeno líquido viene de su ebullición en contacto con el producto y el resto viene del calor sensible del nitrógeno en

gas a temperatura ambiente. Por esa razón el nitrógeno en gas se recircula sobre el alimento en la zona de entrada, donde sube su temperatura mientras hace descender la del alimento. Enseguida este nitrógeno en gas es liberado a la atmósfera. La capacidad de producción llega hasta los 3,000 kg/h, mientras que la velocidad de congelación que se alcanza supera los 10 °C/min, por lo tanto los productos son ultracongelados, es decir se obtienen alimentos congelados individualmente de la mejor calidad, por sus siglas en inglés IQF, en especial cuando la relación superficie - volumen es grande (Aguado, 2002). En la siguiente tabla se pueden observar algunas propiedades de estos elementos refrigerantes

Tabla 4. Propiedades de algunas sustancias criogénicas (Fellows, 1994).

Propiedad	Nitrógeno líquido	Anhídrido carbónico
Densidad (kg/m ³)	784	464
Calor específico (líquido) (kJ/kg K)	1,04	2,26
Calor latente (kJ/kg)	358	352
Capacidad refrigerante total (kJ/kg)	690	565
Punto de ebullición (°C)	-196	-78.5 (sublimación)
Conductividad térmica (W/m K)	0,29	0,19
Consumo/100 kg de producto congelado (kg)	100-300	120-375

Respecto al uso de anhídrido carbónico (bióxido de carbono, CO₂) Aguado (2002) nos dice que tiene un punto de ebullición de -78 °C a presión atmosférica. Cuando el CO₂ llega a los rociadores y es esparcido, un 50 % forma una nieve carbónica y el otro 50 % pasa a formar gas. Este gas se utiliza para la pre congelación y la nieve carbónica que cae sobre el producto lo congela sublimándose. En estos congeladores la zona de congelación debe considerarse un poco más larga ya que la nieve carbónica no cambia de estado tan deprisa como el nitrógeno líquido. El anhídrido carbónico tampoco se recupera y es conducido a la chimenea para su liberación atmosférica.

La elección del refrigerante adecuado viene esencialmente determinada por su costo y la naturaleza del producto a congelar. Las instalaciones frigoríficas para sistemas criogénicos tienen las siguientes ventajas:

- 1.- Los gastos de instalación son bastante inferiores a los de otras instalaciones (aproximadamente el 30 % de los sistemas mecánicos) son muy sencillas y funcionan de forma continua
- 2.- La pérdida de peso del producto por deshidratación es menor (0,5 % comparado con el rango de 1 – 8 % de los sistemas mecánicos por chorro de aire)
- 3.- La congelación es más rápida, lo que afecta menos a las características organolépticas y valor nutritivo de los alimentos
- 4.- Durante la congelación el oxígeno se elimina
- 5.- Su puesta en marcha no requiere ningún periodo previo de preparación (la congelación se inicia nada más al arrancar la instalación)
- 6.- Son de bajo consumo energético.

Su principal desventaja es el costo relativamente elevado del refrigerante. En las instalaciones de congelación en espiral a veces se emplea, en lugar de aire, nitrógeno líquido. Las ventajas de este sistema es que los tiempos de congelación son más cortos y las instalaciones pueden ser más compactas, ya que se ahorra el espacio ocupado por los evaporadores. La congelación rápida de alimentos permite, con instalaciones relativamente poco voluminosas, alcanzar velocidades de congelación muy elevadas en alimentos congelados individualmente (Fellows, 1994).

En el artículo *Comparación de Costos de Energía de los Sistemas Criogénico vs Mecánico*, publicado por el International Institute of Ammonia Refrigeration en 1980, se mencionan algunos puntos importantes que limitan el uso de sistemas de congelación criogénico:

- Altos costos de refrigerante
- Congeladores para pequeñas cantidades

- Congeladores para los mercados a prueba
- Consideraciones de calidad
- Publicidad y ventas altamente presentes en la industria

En el mismo artículo publicado por el International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR) en 1980, se dice que la refrigeración mecánica está dispuesta para gastar lo menos posible el uso de energía. Mientras que los costos de energía del uso de dióxido de carbono líquido son 4.5 veces el costo del sistema mecánico y el costo de energía usando nitrógeno líquido es 17.5 veces comparado con el sistema mecánico. Además del costo de la energía para producir nitrógeno líquido y bióxido de carbono líquido, también es importante considerar los costos de entrega de estos materiales y de almacenamiento. En este artículo el punto de comparación es la congelación de anillos de cebolla fritos y empanadas de carne para hamburguesa, estos productos pueden ser congelados en túneles de congelación de una, dos o tres bandas transportadoras en línea o en el túnel de espiral. La calidad tanto en túneles de aire (congelación mecánica) como en congeladores criogénicos es comercialmente la misma.

Considerar la calidad es importante ya que se ha demostrado que la congelación rápida de los alimentos (carnes, pescados, verdura y precocinados), conserva mejor la calidad inicial de los productos. Esto es debido a que con la congelación rápida se forman pequeños cristales de hielo que respetan en gran medida la estructura original de los alimentos. Con una congelación lenta, se forman grandes cristales que producen roturas celulares de carácter irreversible (Madrid y col., 2003).

1.4.5 Congelación mixta (criogénica-mecánica)

La congelación criogénica, que se acaba de explicar en el punto anterior, y la congelación con sistemas mecánicos como aire, superficie fría y el método por inmersión, tienen cada uno su campo en la congelación de alimentos con zonas comunes que les hacen aparecer algunas veces en competencia. Sin embargo, es posible asociar estas técnicas para aprovechar las ventajas de cada uno en un mismo método de congelación denominado

“congelación mixta”. Con relación a su ubicación respectiva, hay dos formas de utilizarlos (Madrid y col. 2003).

En la congelación criogénica las bajas temperaturas se producen gracias a los propios cambios de fase de los líquidos criogénicos que están en contacto con el alimento. El proceso es muy rápido, pero también muy caro. Para reducir costos y lograr adecuadas velocidades de congelación, se utiliza en ocasiones, un proceso combinado de congelación criogénica y congelación con aire forzado. En este proceso, también conocido como proceso criomecánico, la congelación criogénica produce una corteza dura y fría en torno al producto antes de transferirlo a la cámara de aire en donde se completa el proceso de solidificación (Brennan, 2008).

Además de los productos totalmente congelados por medio de sistemas de congelación criogénicos, se propone un pre enfriamiento o pre acondicionamiento de los alimentos antes que estos entren en un sistema de congelación mecánico. Este sistema se puede aplicar para algunos equipos de congelación deteriorados o inadecuados al proceso de congelación que se va a aplicar. Desde la década de los años 80' se ha empezado a proponer el uso del dióxido de carbono líquido en una combinación mecánica-criogénica. Ahora en día estos sistemas no son exitosos aplicados a un sistema de congelación, los costos de ambos métodos juntos limitan la operación (International Institute of Ammonia Refrigeration, 1980).

La inmersión directa en nitrógeno líquido se ha utilizado como etapa inicial de conservación para algunos productos. Primero se obtiene una congelación rápida de la superficie pasando el producto por una banda transportadora a través de un depósito de nitrógeno líquido de nivel constante, formándose una corteza de unos milímetros que protege al producto, después se continúa la operación por métodos de frío mecánico hasta la congelación total. Los túneles de congelación criogénicos pueden congelar tanto productos a granel como envasados y pueden acoplarse a otros congeladores como etapa previa. Se utilizan para congelar gambas, langostinos, mariscos en general, fresas,

frambuesas, pasteles, panes, hamburguesas, taquitos de pescado, verduras y otros productos (Aguado, 2002).

El método de congelación criogénico en la primera etapa de congelación permite se retire rápidamente el calor del producto a congelar, formando una capa sólida de hielo en la superficie de éste. Al quedar endurecido superficialmente de manera rápida, el producto es menos frágil y resiste mejor los cambios mecánicos. Por otra parte aunque a continuación se realice congelación mecánica hasta el centro y ésta sea más lenta que la primera fase criogénica, la zona periférica congelada rápidamente ejerce un papel protector contra la exudación y pérdida de aromas (Mafart, 1994).

La posibilidad de retirar calor de los alimentos al inicio de la congelación con el método criogénico antes del mecánico (equipos con aire frío, con superficies frías, líquidos incongelables) permite congelar rápidamente la superficie de los productos alimenticios, evitando excesivas pérdidas de peso por deshidratación (García 2003).

Un congelador crio-mecánico tiene un paso inicial de inmersión en el cual el alimento atraviesa por un baño de nitrógeno para congelar la superficie del producto. Este paso reduce la deshidratación y mejora las características de manejo del producto, como pegarse o hacerse un solo bloque de grumos o bloques pequeños. Una vez que la corteza del alimento ya está congelada se transfiere a un congelador mecánico, donde el resto del calor se retira y la temperatura del producto se reduce a la temperatura final de congelación. Madrid y col. (2003) mencionan que al aplicar congelación criogénica antes de la congelación mecánica se obtendrá una mejora en el producto final en calidad, ya que al introducir el producto a la cámara de congelación, la superficie del alimento estará congelada. Cuando el subenfriamiento se realiza criogénicamente, se reduce la carga térmica durante la congelación mecánica con aire. El tiempo de permanencia necesario en la parte del equipo de congelación mecánica se reduce alrededor del 10% y la pérdida de peso del producto se reducirá a la mitad si el producto entra a 0 °C en lugar de 20 °C. El interés del endurecimiento de la superficie de los alimentos por la congelación criogénica,

es más importante para la mejora de la calidad del producto que para el aumento de productividad.

Gamiño y col. (2006) en su trabajo experimental refiere que el método de congelación mixto criogénico-mecánico en congelación de fresa con temperaturas de congelación de $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, en donde el tiempo de duración en la etapa criogénica fue de 19 minutos, mientras que a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se emplearon 25 minutos. Estos tiempos representan un gran ahorro de energía si se considera que en la congelación por método mecánico, el tiempo para alcanzar la misma temperatura fue de 154 minutos. El método mixto criogénico-mecánico es mejor que el mecánico por que ahorra tiempo y energía.

La congelación criogénica también puede utilizarse para reforzar la segunda etapa de congelación después de que el alimento sale de los equipo de congelación mecánica como las cámaras con aire frío. Cuando los alimentos concluyen la etapa de congelación mecánica la diferencia entre la temperatura del fluido frigorífico y la temperatura en la superficie del producto es menor que al inicio, por lo tanto la transferencia de calor disminuye considerablemente ya que durante la primera mitad del tiempo de permanencia en el interior del equipo, el producto pierde alrededor del 70 % de su entalpía total, y solo el 30 % durante la segunda mitad del tiempo de congelación. La idea consiste en reactivar la transferencia de calor jugando sobre el gradiente de temperatura al recurrir al frío criogénico de modo que la temperatura ambiente pueda ser mucho más baja que la del aire en un congelador de frío mecánico. Así pues, la disposición en serie de un aparato criogénico al final del proceso permite aumentar notablemente el rendimiento del congelador por aire, al mismo tiempo que se disminuye el consumo de CO_2 o de nitrógeno líquido del congelador criogénico (Mafart, 1994).

Si la congelación criogénica se coloca después del equipo de congelación mecánica se podrá aumentar la producción, incluso duplicarla, reduciendo el consumo de energía al reducirse el tiempo de permanencia en la cámara de congelación y así mismo se reduce el consumo del material criogénico. El fin es hacer que una instalación de congelación

mecánica se beneficie de la flexibilidad que puede dar la criogenia en lo que se refiere a la capacidad de producción.

Las transferencias de calor son más intensas al principio de la congelación que al final, si el tiempo de permanencia del producto en la etapa mecánica es la mitad del tiempo de congelación, el cambio realizado es de un 70 % a un 75 % de la diferencia de entalpía entre el producto fresco y congelado. La criogenia debe entonces finalizar el proceso de congelación suministrando 20 a 30 % de la diferencia de entalpía: si ésta es de 80 kilocalorías/kilogramo, la criogenia debe aportar de 20 a 24 kilocalorías/kilogramo (Madrid y col., 2003).

1.5 Descongelación

Aunque el proceso de descongelación es el inverso al de congelación, hay diferencias importantes. Si un cuerpo se descongela en una pieza, el calor de fusión tiene que transmitirse por conducción a través de una capa de producto descongelado, mientras que en la congelación se transmite a través de una capa de producto congelado. La conductividad térmica del agua es aproximadamente la cuarta parte de la del hielo y la difusividad térmica aproximadamente ocho veces menor. La diferencia de temperatura entre el punto de congelación y el medio de aporte del calor para la descongelación se encuentra muy restringida por el posible daño térmico a los productos (Brennan, 1980).

La descongelación de productos congelados se puede llevar a cabo utilizando distintas fuentes de calor. Hay dos clases de métodos de descongelación. El primero consiste en aportar calor a la superficie del producto, para lograr esto, se expone la superficie del producto a la acción del aire, vapor de agua, líquido o a la influencia de superficies calientes. En el segundo procedimiento, el calor se genera dentro del producto por calentamiento con microondas o corriente eléctrica (Gruda, 1974).

1.5.1 Métodos de calentamiento superficial

Al utilizar este tipo de procedimientos se reduce la etapa de descongelación aumentando la conductividad calórica tras la descongelación, incrementando la diferencia de temperatura entre el producto y el ambiente. El tiempo de descongelación aumenta principalmente cuando los artículos están envasados, a continuación se exponen los métodos que aplican un calentamiento superficial.

- a) Descongelación con aire. Este método se puede practicar con aire en reposo o con aire en movimiento. La duración y calidad del proceso de descongelación dependen de las condiciones del aire. Se recomienda en general que la temperatura circulante no sea mayor a 20 °C y que la humedad relativa del aire se mantenga por encima del 90 %. Una humedad relativa alta disminuye la desecación y la pérdida de jugo en los alimentos como carnes, frutas, verduras; a la vez, mantiene un elevado coeficiente de transmisión de temperatura. Es importante considerar que altas velocidades de aire acompañadas de temperaturas más bajas provocan manifestaciones de desecación en los alimentos, mientras que temperaturas superiores estimulan la actividad microbiana en las superficies que van registrando mayor temperatura.
- b) Descongelación en vacío. Este procedimiento conocido como VHT (Vacuum Heat Thawing), se ha utilizado en la descongelación de carne, pescado y frutas. Se basa en aprovechar la entalpia latente de evaporación con temperaturas que no ejercen ninguna modificación negativa sobre la superficie del producto. El artículo congelado se coloca en una cámara de vacío cilíndrica horizontal, de la que se extrae acto seguido el aire. El vapor se introduce en la cámara de vacío, procedente de un dispositivo generador del mismo. La temperatura de evaporación del agua depende del vacío alcanzado. Una presión de vapor inferior a 30 mbar (a 20 °C) se consigue utilizando una bomba de agua de dos tiempos. Para una presión de vapor hasta de 9,3 mbar (milibar) (a 6 °C) se utilizan bombas inyectoras de aire acopladas a la bomba de agua. Con una presión de vapor < 8,3 mbar (a 4 °C) se sustituye la bomba inyectora de aire por una bomba inyectora de vapor. La mayor ventaja del

descongelado en vacío es que se logra un coeficiente de transmisión de calor particularmente elevado. El tiempo de descongelación depende de la clase del producto y del espesor de los bloques. Los costes de funcionamiento son un 15 – 20 % menores que en la descongelación al aire o utilizando el calentamiento de alta frecuencia.

- c) Descongelación en líquidos. En este método se emplea agua y también se puede usar una solución de sal común al 5 %. La descongelación en líquidos se puede hacer por inmersión o bien utilizando baños-duchas. Durante la primera etapa de la descongelación la diferencia de temperatura entre la superficie del producto y el medio es grande; el intercambio calórico obedece al coeficiente de transmisión calórica de las capas superficiales. El aumento del intercambio calórico puede conseguirse sometiendo el agua a movimientos forzados con velocidad de 1,5 m/min. En la siguiente fase del proceso, la velocidad de descongelación depende de la clase del producto, de su capacidad conductora de calor y la diferencia de temperatura entre el medio y el producto. El inconveniente de la descongelación en agua es la extracción por disolución de los componentes solubles de los productos, además de las dificultades para mantener el debido nivel higiénico de la instalación.
- d) Descongelación por contacto. Hay productos que se congelan en aparatos de placas múltiples y también se pueden descongelar de la misma manera. En este método de descongelación se utilizan aparatos similares a los congeladores de placas múltiples. La temperatura del líquido de las placas no debe sobrepasar los 20 °C cuando se trata de descongelar productos animales sólidos. La descongelación de productos líquidos o semilíquidos puede hacerse a temperaturas hasta de 40 °C, aunque es importante que el producto descongelado pueda fluir constantemente sin establecer contacto duradero con las placas (Gruda, 1974).

El método de descongelación por ventilación forzada de aire exige que la humedad se mantenga en forma decreciente, la temperatura será de 5 °C o bien decreciente de 20 °C a 5 °C y a una velocidad de 0,25 a 3 m/s. Se considera ese método poco adecuado para la industria, porque es de difícil control, requiere del filtrado del aire para evitar contaminaciones, provocando además, según el tipo de alimentos, deshidrataciones;

además de ser lento, ya que se requieren según el tamaño de la pieza y la temperatura empleada de 24 a 48 horas (Lerena, 1998).

El método de descongelado por inmersión en agua se utiliza generalmente en pescados y pollos, se requiere que el agua se encuentre a temperaturas inferiores a 10 °C (con agregado o no de hielo) para evitar el desarrollo microbiano. Debe realizarse controlando el tiempo de exposición para evitar el ablandamiento en exceso de las carnes, para minimizar este efecto se puede utilizar un film plástico protector que evite el contacto directo con el agua.

Las cámaras de refrigeración de 0,5 a 5 °C pueden utilizarse para la descongelación de productos, aunque en estos casos siempre será conveniente colocar trozos pequeños para reducir el tiempo de exposición y evitar el desarrollo microbiano en el proceso de descongelación (Lerena, 1998).

1.5.2 Métodos de descongelación por calentamiento interno.

En estos sistemas se aprovechan las propiedades dieléctricas de los alimentos congelados, que absorben las radiaciones electromagnéticas y las transforman en calor, lo que trae como consecuencia un aumento de la temperatura del producto. Estos procesos de transformación energética son muy variados y se basan en la actividad iónica, rotación bipolar, fenómenos de electrostricción, piezoelectricidad y resonancia ferromagnética. La cantidad de calor producida al utilizar este procedimiento depende en gran medida de las características eléctricas de los artículos. Se distinguen tres métodos de calentamiento interno: por microondas, el dieléctrico y el de resistencia.

- a) Calentamiento por microondas. Las microondas se hayan contenidas en una zona del espectro electromagnético que va desde 1 mm a 1 m. Para fines industriales sólo se autorizan determinadas zonas de longitud de onda electromagnéticas relativamente pequeñas, que son de $\lambda^1 = 33$, $\lambda = 12,5$ y $\lambda = 1,35$ cm, y las

frecuencias a ellas correspondientes: $f = 915$, $f = 2450$ y $f = 22125$ Hz. Las características comunes de las microondas son:

- Penetración a través de la capa de aire y de aquellos materiales como masas de plástico, porcelana y vidrio.
- Reflexión en las superficies metálicas.
- Absorción por sustancias dieléctricas, entre las que también se cuentan alimentos.

La descongelación con microondas tiene las siguientes ventajas: calentamiento relativamente uniforme de productos homogéneos, acortamiento del tiempo de descongelación, con posible automatización y control simultáneos del proceso, posibilidad de observar estrictas especificaciones de higiene.

- b) Descongelación dieléctrica. En este procedimiento se produce el campo eléctrico mediante electrodos que circundan al producto, pero sin establecer contacto directo con él, las frecuencias más comunes aplicadas son de 27 – 100 MHz. En Suiza se ha patentado el procedimiento de descongelación dieléctrica de bloques de mantequilla regulando simultáneamente la temperatura del aire en la nave de descongelación. Este método aspira a evitar los aumentos excesivos de temperatura en las capas superficiales del bloque, así se reduce la duración del proceso de descongelado desde 7 días a 30 minutos.
- c) Descongelación por resistencia. El sistema se basa en la introducción de corriente eléctrica en el producto a descongelar, que se coloca entre electrodos. Este método se utiliza actualmente para descongelar pequeños bloques de filetes de pescado (con un peso hasta de 3 kg y espesor de 50 mm como límite máximo) (Gruda, 1974).

El método de descongelación por microondas permite una descongelación muy rápida, pero su uso está limitado a pequeños volúmenes, un inconveniente de este método es que parte del alimento puede cocinarse mientras que otra puede encontrarse aun congelada (Lerena, 1998).

La descongelación es una etapa crítica desde el punto de vista microbiológico. El exudado compuesto por agua y sustancias nutritivas aparece en primer lugar en la superficie del producto en la zona donde la temperatura es menos fría y la contaminación inicial es más elevada. Para evitar la reanudación del estado microbiano es conveniente descongelar a baja temperatura y rápidamente (Mafart, 1994).

1.6 Efectos causados por la congelación en los alimentos

Los procesos de congelación inducen un cambio físico en los alimentos congelados. La velocidad del cambio físico o tiempo de congelación determina el tamaño de los cristales de hielo formados. A una velocidad lenta, inicialmente forma cristales de hielo que pueden crecer a un tamaño relativamente grande. Congelación rápida permite una formación de cristales de hielo de tamaño reducido. Sin embargo, en la práctica hay siempre una mezcla de diferentes tamaños de cristales de hielo por que la superficie del producto se congela más rápido que las partes internas. El tiempo de congelación depende de algunos factores, uno es el económico, el cual es un factor primordial a determinar sobretodo en aplicaciones comerciales (Industrial Food Freezing Systems, 1988).

El principal deterioro causado en la estructura de la célula vegetal mediante la congelación es el resultado de la formación de cristales de hielo, por lo tanto la posición y tamaño de los cristales de hielo son críticos. Los cristales de hielo penetran a través de la membrana celular, conduciendo a la pérdida de la presión de turgencia. En segundo lugar existe el deterioro de la estructura de la pared celular causado por el crecimiento de los cristales de hielo. Los cristales de hielo tienden a formarse primero en el exterior de las células, en los espacios intercelulares, donde la concentración de soluto es menor. Cuando la congelación es lenta esos cristales crecen muy grandes y el agua se sustrae del interior de las células para añadirla a los cristales. La formación de cristales de hielo también punciona las membranas celulares internas, permitiendo que las enzimas y los sustratos se mezclen cuando normalmente están separados. Esto da como resultado una amplia variedad de reacciones químicas conduciendo a la ruptura de las células y el desarrollo de aromas y colores extraños. Las proteínas se pueden desnaturalizar por la alteración de su estructura

terciaria o por la rotura en unidades más pequeñas que no se agrupan en la descongelación (Rosenthal, 2001).

El mayor efecto de la congelación sobre la calidad de los alimentos es el daño que ocasiona en las células el crecimiento de los cristales de hielo. En la figura 9 se muestra el efecto de la velocidad de congelación sobre los tejidos vegetales. En la congelación lenta (lado izquierdo de la figura 9) los cristales de hielo crecen en los espacios intracelulares deformando y rompiendo las paredes de las células que se encuentran a su alrededor. La presión de vapor de los cristales de hielo es inferior a la que presentan distintos puntos en el interior de la célula, por lo que el agua pasa de las células a los cristales, engrosándolos. El incremento de la concentración de solutos que la congelación provoca en algunas zonas, origina daños irreparables por causa de la deshidratación. Durante la descongelación las células son incapaces de recuperar su forma y turgencia originales. Como consecuencia, el alimento se reblandece y el material celular se pierde por goteo (drip loss). En la congelación rápida (lado derecho en la figura 9) los cristales de hielo que se forman tanto en el interior de la célula como en los espacios intercelulares, son de menor tamaño. Tampoco se forma un gradiente de vapor, por lo que la deshidratación celular no se produce y la textura del alimento no presenta daños en sus tejidos. No obstante velocidades de congelación muy elevadas pueden provocar, en algunos alimentos, tensiones internas que dan lugar al agrietamiento o rotura de sus tejidos (Fellows, 1994).

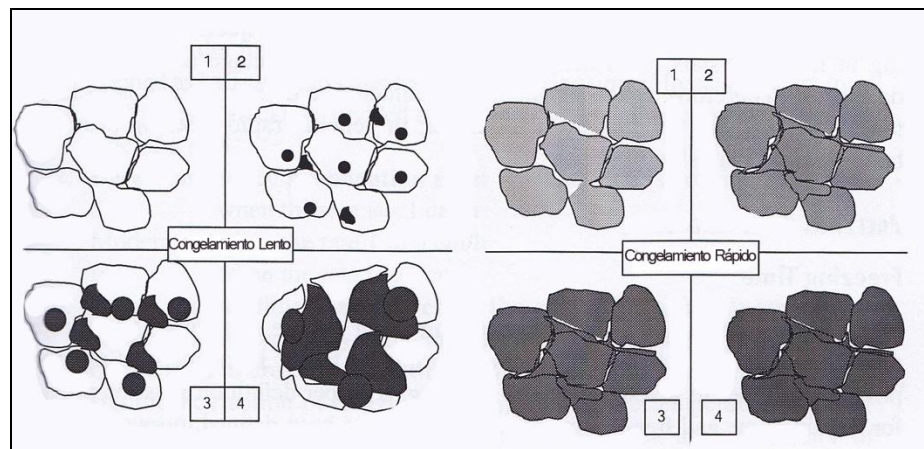


Figura 9. Efectos de la velocidad de congelación en la textura de los alimentos (Ramaswamy y Marcotte, 2006).

Si la velocidad de congelación es rápida, lo cual significa como mínimo conseguir un descenso de temperatura de 5 °C/min en el centro del alimento, se entra rápidamente en la zona de velocidad de nucleación alta y antes de que puedan crecer los núcleos en el líquido extracelular se alcanza el punto de congelación en el citoplasma, con una rápida velocidad de nucleación, que permite la formación de millones de núcleos que se reparten en el agua dando lugar a microcristales inofensivos en todo el alimento. Como se puede ver en el lado derecho de la figura 9 en la congelación rápida se observa que las células no modifican su estructura, debido a que el agua en forma de microcristales de hielo no cambia de lugar, permanece en su lugar como si hubiera sido inmovilizada durante la congelación (Aguado, 2002).

Se pueden producir cambios en las membranas celulares con la consiguiente pérdida de agua y de enzimas que son las responsables de los cambios de color y de olor que se producen durante la descongelación. Por lo tanto la calidad de los productos congelados puede mejorarse realizando una congelación rápida y con el uso de crioprotectores como azúcares o con un pre tratamiento como el escaldado ya que de esta forma se reducen los daños de las paredes celulares y la actividad de las enzimas. Los daños producidos en los tejidos vegetales durante la congelación pueden explicarse considerando las cuatro etapas del proceso sugeridas por Reid: refrigeración (temperatura superior a los 0 °C), concentración de soluto, deshidratación celular y daños causados por los cristales de hielo (Brennan, 2008).

1.7 Deformación de textura en los alimentos

El estudio de la deformación se ha aplicado extensivamente en frutas y hortalizas en un esfuerzo para comprender la relación entre la estructura, la textura y los cambios inducidos durante el proceso. En frutas y hortalizas, la textura se mide con dos propósitos principales: 1) para determinar la madurez de los cultivos con el objetivo de predecir la fecha óptima de cosecha y 2) para determinar la calidad del producto procesado (Rosenthal, 2001).

Textura y estructura de los alimentos están vinculadas, por tal motivo la composición estructural de los alimentos determinará la percepción sensorial, y cualquier cambio en la estructura conlleva el riesgo de cambiar la textura percibida y la violación de las expectativas del consumidor. La textura de alimentos sólidos es percibida principalmente por las picaduras de los incisivos y por la molienda de los molares (Kilcast, 2004).

En trabajos realizados con fruta como la fresa, utilizando el método de congelación criogénico-mecánico, se estudia la calidad de la fresa descongelada, se encontró que la dureza de la fresa disminuye afectando la calidad final del producto (Gamiño y col., 2006).

Los cambios en la textura de frutas y verduras ocasionan la pérdida de la firmeza en los tejidos, lo cual se contrapone a la tendencia actual de los consumidores, quienes prefieren textura cada vez más firmes en estos productos procesados (Aguilar, 1999).

La congelación destruye la integridad celular; en el transcurso de la descongelación, las membranas de las células muertas se vuelven muy permeables, de manera que el contenido vacuolar se riega (sales, azúcares, pigmentos, etc.). El exudado comienza a difundirse durante la descongelación, reduciendo el valor alimenticio. La cantidad exudada depende de la naturaleza del producto, de la rapidez de congelación y descongelación y del estado físico (por ejemplo el grado de maduración de la hortaliza o fruta) (Instituto Internacional del Frio, 1990)

Rosenthal (2002) hace mención de la clasificación hecha por Scott-Blair de las técnicas instrumentales utilizadas para medir la textura de los alimentos en 3 grupos:

1. Ensayos empíricos, que miden propiedades físicas bajo condiciones bien definidas. Los ensayos empíricos se desarrollan por experimentación y observación, y como tales pueden carecer de una base científica rigurosa.

2. Ensayos imitativos, que intentan simular las condiciones a las que el material está sometido en la boca. Intentan imitar la masticación con cierto tipo de máquina que mastica el alimento, la máquina está equipada para proporcionar medidas de esfuerzo y/o deformación durante la secuencia de ensayo. Un ensayo imitativo que ha captado la imaginación de muchos tecnólogos en alimentos debido a que pretende proporcionar valores estándar de textura de los alimentos es el Análisis de Perfiles de Textura (TPA- Texture Profile Análisis), creado por General Foods a mediados de los 60's. Además fue descrito un instrumento fuerza de compresión-deformación. Basado en un instrumento que deforma el alimento a través de un movimiento de giro (semejante a la mandíbula humana), el texturómetro de la General Foods utilizó un embolo acabado en plano para contactar con la muestra del alimento.

3. Ensayos fundamentales, que miden propiedades físicas bien definidas, tales como, la viscosidad o el módulo elástico. Los ensayos fundamentales miden propiedades físicas innatas de los materiales tales como el módulo de Young o la razón de Poisson. Dichos ensayos son científicamente rigurosos y los datos son expresados en unidades cinéticas bien definidas (Rosenthal, 2001).

1.7.1 Análisis de textura en alimentos sólidos

El ensayo de penetrometría consiste en introducir una longitud dada de un punzón, de forma y tamaño conocidos, en el producto a analizar. El ensayo básico mide la fuerza necesaria para realizar esta penetración. Se define el esfuerzo normal, como el cociente entre la fuerza aplicada y la superficie de contacto, mientras que la deformación viene dada por el cociente entre la variación de altura de la muestra y su altura inicial (Claude y Roudot, 2004).

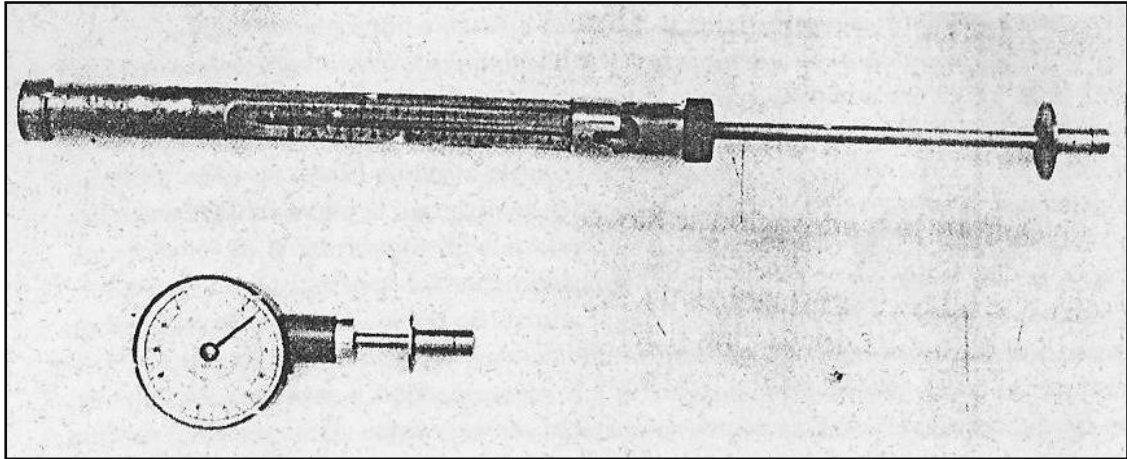


Figura 10. Penetrómetros: Effegi (abajo) y Magness Taylor (arriba) (Wills, 1990).

Los penetrómetros se han utilizado ampliamente para medir la textura de frutas tales como manzanas, melocotones y cerezas. El ablandamiento puede valorarse subjetivamente, mediante presión ejercida con el dedo pulgar, pero también puede medirse objetivamente obteniendo una expresión numérica de su consistencia, mediante un penetrómetro o un medidor de presión. Dos instrumentos de este tipo, comúnmente usados, en los que se determina la resistencia a la penetración de un émbolo de dimensiones determinadas, son el “Magness-Taylor y UC Fruti Firmness Effegi testers”, el instrumento más pequeño y eficaz de Effegi, mostrados en la imagen anterior (Wills, 1990).

1.8 Termopares

El termopar se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, que trata de la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantiene a una distinta temperatura. Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier (1834) que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de los metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson (1854) que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas (Creus, 2006).

Los termopares bimetálicos están compuestos por una base de metal y una aleación. Estos termopares son identificados por letras designadas originalmente por la Sociedad de Instrumentos de América, esta clasificación es aceptada internacionalmente y se presenta en la siguiente tabla. El uso de los termopares bimetálicos para medir temperaturas de moderada precisión requiere cuidadosa consideración con respecto al diseño, especificaciones y aplicación, por ejemplo el rango de temperatura que deben de medir.

Tabla 5. Clasificación de termopares. Techniques and Thermometers Traceable to the International Temperature Scale of 1990(ITS-90)

Tipo de Termopar	Materiales de formación.
Tipo T	Cobre (+)/ Cobre-níquel aleación (-)
Tipo J	Hierro (+)/ Cobre-níquel aleación (-)
Tipo K	Níquel-cromo en aleación (+)/Níquel-aluminio aleación(-)
Tipo E	Níquel-cromo en aleación (+) / Cobre-níquel en aleación (-)
Tipo N	Níquel-cromo-silicón en aleación (+) / Níquel-silicón aleación (-)
Tipo R	Platino 13 % Rodio (+) / Platino (-)
Tipo S	Platino 10 % Rodio (+) / Platino (-)
Tipo B	Platino 30 % Rodio (+) / Platino 6 % Rodio (-)

El Termopar tipo T tiene su desempeño dentro de rango de temperaturas de -200 °C a 350 °C y es el termopar bimetálico más exacto. Sólo es limitado al llegar a los 360 °C debido a la oxidación del cobre. La precisión usualmente alcanzada es de 1 K (Kelvin) y puede ser usado en vacío y en oxidación (Techniques and Thermometers Traceable to the International Temperature Scale of 1990).

Existen termómetros con alta capacidadde resistenciachoques, vibraciones, alta presión y otros entornos hostiles, en el ITS-90 se exponen dichos tipos de termómetros, los Termómetros de Resistencia de Platino Industrial, por sus siglas en ingles IPRT's y los Termómetros de Resistencia de Platino Estándar (SPRT's). Existen algunas diferencias entre ellos, por ejemplo el platino utilizado para fabricar los IPRT's es de menor calidad

que el utilizado en los SPRT's, los IPRT's tienen menor reproducibilidad que los anteriores.

1.8.1 Construcción de termopares.

Un termopar consiste en un conjunto de elementos que incluye dos cables diferentes soportados por un aislante eléctrico unidos por un extremo para formar la unidad de medición, además de un tubo de protección (de cerámica o de metal) que protege de los efectos del medio que puede ser corrosivo, oxidante o reductor, además de un conector para la terminación de los cables. La construcción clásica de termopares consta de dos alambres enfundados para protegerlos de las condiciones de medio al que se exponen. Las puntas de los alambres se unen para formar la unión caliente. Hay varios métodos para la soldadura de la unión caliente, por ejemplo: soldadura fuerte, soldadura dura, soldadura blanda, sujeción o torsión de los alambres. La unión debe proporcionar un buen contacto eléctrico y debe ser tan pequeña como sea posible. Los materiales fundentes deben ser usados con moderación, ya que el riesgo de contaminación es alto.

Los termopares deben estar en una condición de equilibrio termodinámico para asegurar la estabilidad metalúrgica sobre el rango de temperatura de aplicación. Un tratamiento térmico debe ser necesario para hacer un reconocimiento del estado de los termopares. Una prueba difícil para adecuar el procedimiento de reconocer los termopares es la reproducibilidad de la fuerza electromotriz del termopar a algunas temperaturas fijas después de periodos consecutivos de reconocimiento. Para evaluar el desempeño de un circuito de termopar se deben considerar las numerosas posibles fuentes de error: la derivación térmica, derivación eléctrica, calibración, falta de calibración, cables de extensión, unión de referencia (Techniques and Thermometers Traceable to the International Temperature Scale of 1990).

En el caso de los termopares tipo K, E, T y J (todo aquel que contiene níquel o níquel-cromo). El equilibrio termodinámico está limitado por la difusión de los materiales de construcción (intervalo de temperatura de 300 °C a 500 °C) y procesos de

transformación magnética (rango de temperaturas de 50 °C a 200 °C), de manera que una alta precisión de 0-1 K sólo puede obtenerse por un especial tratamiento de calor usando específicos procedimientos de calibración (Burley et al. 1982).

1.8.2 Calibración de termopares bimetálicos

La calibración de un termopar consiste en la determinación de su fuerza electromotriz en un número de temperaturas conocidas, algunas de las cuales pueden ser puntos fijos, de modo que con algunos medios aceptados de interpolación su fuerza electromotriz se puede conocer en todo el rango de temperaturas en el cual serán usados los termopares. El número de puntos necesarios para la calibración y alcanzar su límite de precisión será mayor debido a las relaciones más complejas entre temperatura y fuerza electromotriz. Debido a esto los métodos de interpolación entre los puntos de calibración de vital importancia para la precisión de interpolación se aproximan a 1 K. Para precisiones inferiores pueden ser suficientes métodos sencillos de calibración, por ejemplo la comparación con un termómetro estándar en un ambiente isotérmico. Los errores en la calibración pueden ser de dos tipos: los que influyen en las observaciones de los puntos de calibración y los derivados de la interpolación entre los puntos de calibración. Los primeros errores se pueden reducir mediante el uso de equipos especializados y técnicas cuidadosas. El método para reducir el segundo error es adaptar las diferencias entre los valores de calibración observados y los valores obtenidos a partir de las tablas de referencia estándar. Para determinar la curva de desviación se puede aplicar el método de mínimos cuadrados aunque también se puede usar un método gráfico de interpolación (Techniques and Thermometers Traceable to the International Temperature Scale of 1990).

1.8.3 Validación

La validación es el sentido común organizado y documentado, esta definición marca los pilares básicos de la validación: la organización y la necesidad de documentar resultados. Se destacan tres aspectos principales en el campo de la validación: primero la necesidad de documentar el proceso de validación, es decir de disponer todo por escrito;

segundo la necesidad de proveer un alto grado de seguridad del proceso, es decir la certeza de que el sistema trabajara correctamente y tercero la necesidad de que el proceso producirá repetidamente resultados aptos que cumplan con las especificaciones (García, 2001).

La validación retrospectiva según García (2001) es el estudio para demostrar y establecer una evidencia documentada de que un proceso hace lo que estaba previsto sobre la base de una revisión y análisis de información histórica, no existe una recomendación única para validar y cuáles son los controles o ensayos.

La validación retrospectiva de procesos se basa en la recopilación de datos históricos, a partir de los cuales se obtiene documentación útil para la determinación de la reproducibilidad de dicho proceso. Para la obtención de información no es necesario aplicar ensayos analíticos ni tampoco se requiere de una supervisión del proceso en forma explícita, lo que la hace una metodología económica. Por otra parte algunos inconvenientes se presentan en la recolección de datos, pues en ocasiones no se cuentan con sistemas automatizados que permitan una rápida recopilación de éstos. El trabajar con datos acumulados que pueden contener el registro de mediciones obtenidas por distintos operarios, da la posibilidad de que estos datos tengan un cierto grado de error, sumado a la variabilidad intrínseca de las mediciones y a la veracidad de éstos registros que podrían restarle veracidad de los resultados finales del estudio (González, 2005).

El sustento de la validación retrospectiva está en la condición de que la composición, los procedimientos y el equipamiento permanezcan sin cambios, y que la experiencia con la instalación y los resultados de control de procesos y del producto final sean evaluados. Se compilan los resultados de los análisis y se determina si el proceso se encuentra dentro de los límites permisibles. Esta es la vía más común de validación de todos los procesos que han sido llevados a cabo rutinariamente sin haber sido validados antes.

La validación prospectiva es el estudio para demostrar y establecer una evidencia documentada de que un proceso hace lo que está previsto basado en un protocolo planificado.

La validación concurrente es un estudio para demostrar y establecer evidencia documentada de que un proceso hace lo que debe de hacer basado en información generada durante una implementación real del proceso (García, 2001).

Es importante mencionar que la validación prospectiva se lleva a cabo durante la etapa de desarrollo y es el resultado de un análisis de riesgo en el proceso productivo. Es muy útil aplicarla cuando se prevé efectuar cambios en el proceso de fabricación que pueden afectar las características del producto. La validación concurrente se lleva a cabo durante la producción normal. La evaluación de los resultados de este tipo de validación se emplea para establecer la naturaleza y las especificaciones de los controles del proceso y del producto final. Mientras tanto la validación retrospectiva mira atrás a las experiencias obtenidas durante la producción, se sustenta en la condición de que la composición, los procedimientos y el equipamiento permanezcan sin cambios (Ministerio de Salud Pública, 1994).

1.8.4 Validación de termopares

La validación es la confirmación y la provisión de evidencia objetiva de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico propuesto. De tal manera que la validación supone una demostración o prueba de que un proceso funciona tal y como se espera del mismo. Los parámetros siguientes son indicadores relevantes del control del proceso. Es necesario establecer una metodología de validación para termopares, para eso se validaran los siguientes puntos críticos en el proceso de medición de temperaturas.

a) Exactitud

En términos sencillos, la exactitud de una medición es la concordancia del resultado de la misma comparada con el valor verdadero del objeto que está siendo medido. Es importante tener en cuenta que la exactitud de un instrumento de medición solo puede conocerse y cuantificarse con materiales de referencia (Ramírez, 2009). Para seleccionar el termopar con mayor exactitud se lleva a cabo con apoyo de las técnicas estadísticas que corresponden a la prueba de hipótesis en el conocimiento de exactitud.

b) Precisión

Proximidad de concordancia entre valores medidos obtenida por mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2009).

La precisión es un término relacionado con la confiabilidad de un instrumento, es decir, si un instrumento proporciona resultados similares cuando se mide un material de referencia de manera repetida, entonces el instrumento es preciso. Por ejemplo, si se mide con un micrómetro un patrón de longitud 10 o 15 veces y la desviación estándar de los resultados de las mediciones es pequeña, digamos, 0.1% del valor central, entonces se puede considerar al instrumento como preciso (Ramírez, 2009).

c) Repetibilidad y Reproducibilidad

Repetibilidad. Precisión de una medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad de condición (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2009).

Reproducibilidad. Precisión de una medida bajo condiciones de reproducibilidad (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2009).

La repetibilidad es un parámetro que evalúa la precisión del resultado de las mediciones y tiene en cuenta al operario. La reproducibilidad evalúa la precisión del resultado de las mediciones y tiene en cuenta el método.

Las condiciones de repetibilidad y reproducibilidad se refieren a que las mediciones se hagan bajo condiciones bien establecidas y controladas: ambiente, instrumento, método documentado, calibración, etc. Si un operario obtiene resultados cercanos al valor verdadero y además la dispersión es pequeña, las mediciones tienen buena repetibilidad. Si operarios distintos, obtienen resultados cercanos al valor verdadero y la dispersión es pequeña, las mediciones tienen una buena reproducibilidad. La exactitud y la precisión sólo evalúan el instrumento en condiciones controladas de calibración y en manos de un experto (Ramírez, 2009).

CAPITULO II

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

2.1Objetivos

2.1.1Objetivo general

Evaluar la influencia del proceso de la congelación mixta (mecánica-criogénica y criogénica-mecánica), mediante el ensayo de penetración y pérdida de peso en zanahoria y brócoli determinando las características finales obtenidas al combinar dos métodos de congelación en el mismo proceso.

2.1.2. Objetivos particulares.

Objetivo particular 1

Analizar el efecto de la congelación mecánica-criogénica sobre las propiedades físicas de zanahoria y brócoli sometidas a la variación del diferencial de temperaturas inicial, intermedia y final del proceso de congelación, encontrando la mejor interacción que permita obtener mayor calidad en textura en el producto final descongelado.

Objetivo particular 2

Analizar el efecto de la congelación criogénica-mecánica sobre las propiedades físicas de zanahoria y brócoli sometidas a la variación del diferencial de temperaturas inicial, intermedia y final del proceso de congelación, encontrando la interacción que proporcione mayor calidad de la textura en el producto final descongelado.

2.2. Variables

En el proceso de congelación se consideraron diferentes variables que influyen en la calidad final del alimento. El método de congelación es una de las principales variables que imparten gran influencia en el resultado final, el método puede ser rápido o lento con equipos mecánicos o criogénicos, de contacto directo o indirecto. La velocidad de congelación influye directamente en la etapa de nucleación y en el crecimiento de los cristales y depende de la temperatura del medio de congelación. El tiempo de congelación depende de las temperaturas del alimento inicial y final, de la cantidad de calor del alimento que va a ser retirada en cada etapa de la congelación. El tiempo de congelación se utiliza en el cálculo de la velocidad de congelación para determinar si fue un proceso rápido o lento. Una variable importante a considerar es el tamaño del alimento que será congelado, pueden ser vegetales pequeños enteros o cortes de diferente espesor de alimentos grandes como piezas de carne o trozos de vegetales, ya que si el alimento tiene grandes dimensiones la temperatura final de congelación tardará más tiempo en alcanzarse en el centro térmico de los alimentos, en comparación si se congelan alimentos con espesores pequeños el frente frío llegará más rápido al centro térmico. Es importante considerar si los alimentos se van a congelar envasados, la forma y material del envase.

2.2.1 Selección y justificación de variables

Uno de los métodos más antiguos de conservación de alimentos es la congelación, en la actualidad constituye un método excelente para mantener inalteradas durante un tiempo prolongado las características originales de alimentos perecederos. En el proceso de congelación las dos variables más importantes son la velocidad y la temperatura de congelación (Gamiño, 2006).

La velocidad de congelación se tomó como una variable de respuesta, debido a que permite conocer si la velocidad fue rápida o lenta en los intervalos de congelación mecánica y criogénica; en las etapas de nucleación y en el crecimiento de los cristales es importante que la velocidad de congelación no sea lenta (valores inferiores a $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

Se trabajó combinando dos tipos de congelación durante el mismo proceso: criogénico-mecánico y mecánico-criogénico con los siguientes intervalos de temperaturas de congelación:

- a) En el intervalo de 10 °C a -5 °C se aplicó congelación mecánica, seguida de la congelación criogénica con bióxido de carbono en el intervalo de -5 °C a -20 °C; en la segunda etapa de experimentación se aplicó primero congelación criogénica en el intervalo de temperatura de 10 °C a -5 °C y congelación mecánica en el intervalo de -5 °C a -20 °C.
- b) En la experimentación se tuvo un segundo intervalo de temperaturas, de 10 °C a -10 °C donde se aplicó congelación mecánica y de -10 °C a -20 °C aplicando congelación criogénica. El mismo intervalo de temperaturas se utilizó posteriormente intercambiando los métodos de congelación, primero se utilizó congelación criogénica con bióxido de carbono en el intervalo de 10 °C a -10 °C y en seguida se aplicó congelación mecánica de -10 °C a -20 °C.

La producción de vegetales como brócoli y zanahoria son importantes en los estados del bajo, ya que son productos de exportación además de ser perecederos y de ubicarse en los refrigeradores de productos congelados de todos los supermercados, por lo que es importante congelarse de inmediato. Aunque la congelación mecánica y la criogénica aparecen muchas veces en competencia, tienen un campo de aplicación en conjunto. Es importante aplicar métodos de conservación que eviten el deterioro y conserven la apariencia y elementos nutritivos de los productos congelados (Gamiño, 2006).

2.2.2 Definición de variables y niveles de variación

En el siguiente cuadro se muestra las variables independientes con sus niveles de variación, las variables dependientes y variables de respuesta que se observaron para analizar los resultados obtenidos.

Tabla 6. Definición de factores y variables

Variable Independiente	Niveles de variación	Número de repeticiones	Variable dependiente	Variable de respuesta	Técnica de medición
Tipo de Congelación	-Mecánica-criogénica -Criogénica-mecánica -Criogénica -Mecánica	3	-Tiempo de congelación	- Esfuerzo normal de penetración.	-Ensayo de penetración
Intervalos de Temperatura de Congelación	a) De 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C b) De 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C			- Pérdida de peso	-Diferencia de pesos
Naturaleza del producto	-Zanahoria (rodajas) -Brócoli (pequeños floretes)			- Velocidad de congelación	- Termopares.

2.3 Actividades previas

Las actividades previas se realizaron con el fin de adecuar las operaciones necesarias para la experimentación y reducir los errores durante el trabajo experimental. Se ajustaron y calibraron los equipos de medición de temperaturas y se acondiciono la cámara de congelación y el uso del bióxido de carbono o hielo seco.

2.3.1 Validación de termopares

Durante el proceso experimental fue importante el registro de las temperaturas en las muestras de brócoli y de zanahoria durante las etapas de escaldado, congelación y descongelación, para ello se utilizaron 6 termopares de tipo T de cobre y aleación de níquel.

El método usado para calibrar los termopares se tomó del Techniques and Thermometers Traceable to the International Temperature Scale of 1990, donde se menciona que para precisiones inferiores pueden ser suficientes métodos sencillos de calibración, por ejemplo la comparación con un termómetro estándar en un ambiente isotérmico. La calibración de un termopar consiste en la determinación de su fuerza electromotriz (fem) en un número de temperaturas conocidas, algunas de las cuales pueden ser puntos fijos, de modo que con algunos medios aceptados de interpolación su fuerza electromotriz se puede conocer en todo el rango de temperaturas en el cual son usados los termopares. Los termopares se colocaron dentro de un vaso de precipitado de 200 ml con agua, se aplicó calor por medio de una parrilla eléctrica, se registraron las temperaturas del agua leídas por los termopares a cada minuto hasta llegar a 95 °C, temperatura de ebullición a presión atmosférica de 585 mmHg, una vez que el agua alcanzó esta temperatura se mantuvo constante por unos minutos. Se utilizó un termómetro de mercurio para registrar la temperatura del agua al mismo tiempo que los termopares estaban dentro del recipiente, con el fin de tener una referencia de los registros de temperatura de un instrumento estándar. Los termopares se conectaron a un selector de termopares manual con pantalla para mostrar la temperatura.

La validación retrospectiva de termopares tuvo como objetivo, seleccionar un termopar a través de la suma de atributos mediante pruebas efectuadas para corregir las temperaturas de otros termopares. Para seleccionar el termopar con los mejores atributos se realizó una tabla donde se muestran los resultados de cada prueba realizada con los termopares. Se seleccionó el termopar con la mayor precisión, mejor exactitud y el mayor valor de correlación. En base al termopar seleccionado se realizó una gráfica con las temperaturas de dicho termopar como variable dependiente y los valores de los demás termopares como variable independiente. Se obtuvieron las pendientes, el coeficiente de regresión y la ordenada al origen para usarlos en la siguiente ecuación que permite obtener las temperaturas corregidas de los demás termopares:

$$T_a = mT_p + b \quad (4)$$

T_a = Temperatura del termopar a corregir (°C)

T_p = Temperatura del termopar seleccionado (°C)

m = pendiente

b = ordenada al origen

Considerando que $T_p = T_c$, donde T_c = temperatura del termopar corregido

$$T_a = mT_c + b \quad (5)$$

Despejando T_c

$$T_c = \left[\frac{T_a - b}{m} \right] \quad (6)$$

Para consultar los resultados de la validación de termopares referirse al apéndice.

- Exactitud.

Concordancia entre un valor medido de la magnitud y el valor real. Se utilizaron pruebas estadísticas para obtener el termopar con mayor exactitud. Se realizó un histograma de frecuencia para obtener la desviación estándar, el termopar con el valor de desviación estándar más bajo es el que presentó una mayor exactitud.

- Precisión.

Similitud entre los resultados de las mediciones de un material. El termopar que presentó menor dispersión en la prueba estadística de coeficiente de variación es el más preciso.

- Linearidad

Relación entre la entrada y la salida de la magnitud a medir, no siempre es posible conseguir una relación lineal dado la naturaleza del instrumento a emplear. En este caso se aplicó una ecuación de 4º orden para analizar el comportamiento de los termopares en la gráfica de temperatura contra tiempo. Esta prueba se realizó para verificar que los termopares guardan una relación lineal sobre el intervalo de temperaturas del sistema donde se realizan las mediciones. Las temperaturas que se registraron durante el calentamiento del agua y en el punto de ebullición se graficaron para obtener dos líneas de tendencia para cada termopar. La primera línea representa el aumento de temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición y la segunda línea representa la parte donde la temperatura se mantiene constante una vez que alcanza el punto de ebullición.

2.3.2. Caracterización de la cámara de congelación

La cámara de congelación se encuentra en la nave 2000 de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Para registrar la velocidad del aire en diferentes puntos dentro de la cámara de congelación, ésta se dividió en cuadrantes y se seleccionó el cuadrante 3F para colocar los vegetales a congelar, en el cual la velocidad forzada del aire se considera despreciable. La temperatura que debe mantener la cámara de congelación durante el proceso se fijó a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 11).

2.3.3. Caracterización del bióxido de carbono.

El bióxido de carbono sólido conocido como hielo seco, tiene una temperatura aproximada de $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica de 585 mmHg (presión atmosférica en Cuautitlán). Se compraron bloques de hielo seco con un peso de 6 kilogramos partidos por la mitad. El proveedor del bióxido de carbono fue la empresa Praxair. En la etapa de congelación criogénica las muestras se colocaron entre las dos barras de bióxido de carbono cubriendo la parte superior y posterior de los vegetales.



Figura 11. Cámara de congelación.

2.4 Etapa experimental

En la primera parte en esta etapa se acondicionaron los vegetales, las zanahorias de la variedad *Berlicum* y *Autumnking* se lavaron con agua y se les retiró la piel con un pelador, se cortaron en rodajas de 1 cm de ancho y se seleccionaron las muestras que tuvieron un peso entre 6 y 7 g. El brócoli *Básica oleracea* variedad *Italica*, se cortó en ramos de florescencia con un peso aproximado entre 12 y 13 g.

En cada repetición se trabajó con 15 muestras ya sean de brócoli o de zanahoria según corresponda, de las cuales se seleccionaron 3 de brócoli y 3 rodajas de zanahoria, y en cada caso se identificaron como muestra 1, muestra 2 y muestra 3, estas muestras se

monitorearon para registrar el peso de los vegetales en estado fresco y después de los procesos de escaldado, congelación y descongelación.

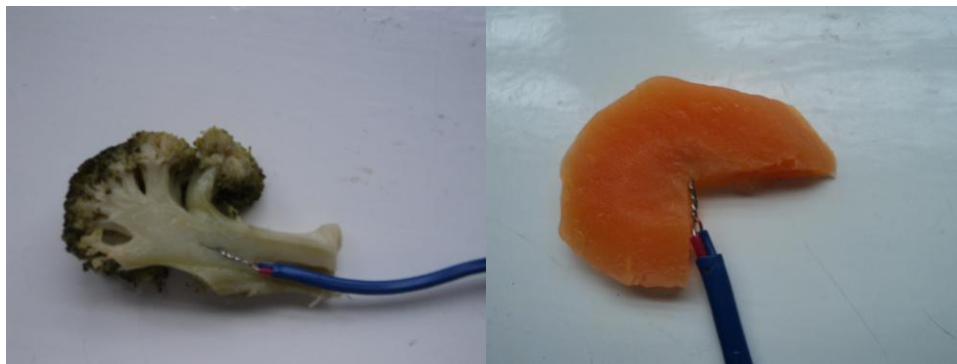


Figura 12. Brócoli y zanahoria con termopar.

Para registrar las temperaturas del brócoli y la zanahoria durante las etapas del proceso para cada experimentación, se seleccionaron de las 15 muestras iniciales, 3 muestras para colocar un termopar a cada una en el centro térmico y registrar las temperaturas en cada etapa del proceso experimental (Figura 12). En la zanahoria el centro térmico es justo en el centro del diámetro localizado en la parte central de la figura geométrica. En el brócoli el termopar se insertó por la base del tallo, justo en el centro del diámetro de éste, subiendo hasta llegar a la parte donde inicia el florete. La referencia del centro térmico del brócoli se obtuvo de la tesis experimental de Gallardo (2004).



Figura 13. Selector de termopares manual y lector de temperaturas.

Para leer las temperaturas de cada termopar se utilizó un selector (figura 13) con pantalla para mostrar las temperaturas de los termopares cada minuto. Durante las etapas del proceso de experimentación: escaldado, congelación y descongelación, se utilizaron 3

termopares para colocar cada uno dentro de las muestras, mientras tanto un termopare extra registró la temperatura del medio en cada etapa del proceso.

En las muestras frescas antes de empezar con el escaldado se seleccionaron 3 muestras de brócoli y 3 de zanahoria del grupo inicial de las 15 muestras de cada vegetal, con excepción de la 1, 2 y 3 que se destinaron para registrar el peso después de cada etapa experimental. En las 3 muestras frescas de cada vegetal se realizó el ensayo de penetración. Las muestras analizadas no continuaron en el proceso, ya que la prueba con el penetrómetro es destructiva y daña la textura del alimento lo que podría ocasionar obtener resultados erróneos en las pruebas posteriores. Después de eliminar las 3 muestras frescas del ensayo de penetración las 12 muestras restantes para cada caso ya sea brócoli o zanahoria, se sometieron a los procesos de escaldado, congelación y descongelación.

2.5 Escaldado de las muestras

Las 12 muestras restantes, incluyendo las 3 muestras con los termopares, se sometieron a un escaldado con vapor de agua a temperaturas de hasta 97 °C durante 3 minutos. El proceso se realizó colocando las muestras en una rejilla metálica para después introducirlas en un recipiente tapado para contener el vapor de agua hirviendo, una vez que se registraron temperaturas de 97 °C dentro del recipiente, se introdujeron los vegetales y se continuo registrando la temperatura para asegurar que ésta se mantuviera durante los 3 minutos del escaldado en 97 °C. Inmediatamente saliendo del escaldado las muestras se sometieron a una ducha de agua fría con temperatura entre 3 °C y 4 °C. Al terminar el escaldado se eligieron 3 muestras para hacerla prueba de esfuerzo normal con el penetrómetro y registrarlos valores de los kilogramos fuerza que resisten los vegetales sobre su textura una vez que son escaldados. Después del ensayo de penetración las muestras se deformaron por la fuerza aplicada con el penetrómetro, éstas muestras ya no se utilizaron más en el proceso. Las muestras designadas con los números 1, 2 y 3 se pesaron después de ser escaldadas para continuar monitoreando el peso y analizar si existe pérdida o aumento del peso en esta etapa del proceso.

2.6 Congelación de las muestras

Los tipos de congelación que se aplicaron en brócoli y zanahoria fueron: criogénico-mecánico y mecánico-criogénico, las etapas de congelación fueron de acuerdo a los siguientes intervalos de temperaturas de congelación: a) de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C, b) de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C.

- a) **Tipo de congelación mecánico-criogénico con intervalo de temperaturas de congelación de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C.** Después de ser escaldadas, las 9 muestras restantes de brócoli y de zanahoria según fue el caso, se colocaron sobre una rejilla de metal para meterlas en la cámara de congelación sobre una superficie plana, y ser congeladas con el método mecánico en la cámara de congelación. La temperatura del medio dentro de la cámara fue -25 °C, con esto se logró descender la temperatura de las muestras de 10 °C a -5 °C, al llegar a ésta temperatura el proceso de congelación continuó con el método criogénico, la temperatura siguió descendiendo de -5 °C hasta llegar a la temperatura final del proceso establecida en -20 °C. En la congelación criogénica las muestras del vegetal se colocaron entre dos bloques de bióxido de carbono de aproximadamente 3 kg de peso cada uno.
- b) **Tipo de congelación mecánico-criogénico con temperaturas de congelación de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C.** Después del escaldado, las 9 muestras se colocaron en la rejilla de metal, con una temperatura inicial de 10 °C se introdujeron en la cámara de congelación donde se congelaron hasta -10 °C, durante la congelación mecánica la temperatura del medio fue de -25 °C. Enseguida se continuó con la congelación criogénica (bióxido de carbono) para descender la temperatura de -10 °C a la temperatura final de -20 °C, las muestras se colocaron entre los dos bloques de bióxido de carbono sostenidos por dos piezas de madera del espesor de las muestras, así la transferencia de calor se dará por la parte superior e inferior de los vegetales sin dañar las zanahorias y el brócoli con el peso de los bloques de bióxido de carbono.

- c) **Tipo de congelación criogénico-mecánico con temperaturas de congelación de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C.** Las muestras escaldadas listas para la congelación, con una temperatura aproximada de 10 °C, se colocaron entre dos bloques de bióxido de carbono (hielo seco) soportados por dos piezas de madera del espesor de las muestras, cada bloque con un peso aproximado de 3 kilogramos y una temperatura inferior a -50 °C. Una vez registrada la temperatura de -5 °C en las muestras, se continuó la congelación con frío mecánico en la cámara de congelación que tenía una temperatura de -25 °C, Las muestras de los vegetales se sometieron a la congelación mecánica sobre las rejillas de metal dentro de la cámara de congelación, la temperatura final en las muestras congeladas fue de -20 °C.
- d) **Método de congelación criogénico-mecánico con temperaturas de congelación de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C.** En la primera etapa se utilizó la congelación criogénica con bióxido de carbono (hielo seco) para descender la temperatura de las muestras de 10 °C a -10 °C. Durante ésta primera parte las muestras se colocaron entre los bloques de bióxido de carbono, cada bloque pesa aproximadamente 3 kilogramos con temperaturas inferiores a -50 °C. Una vez que las muestras alcanzaron la temperatura de -10 °C se colocaron en la rejilla metálica y se metieron en la cámara de congelación, con una temperatura del medio de -25 °C, en las muestras de vegetales la temperatura continuó descendiendo hasta llegar de -10 °C a -20 °C.

Se congelaron un grupo de muestras con los métodos mecánico y criogénico por separado, sin combinarse ambos métodos, la temperatura inicial de los vegetales fue de 10 °C y la temperatura final de la congelación fue de -20 °C.

2.7 Descongelación

Al final de cada método de congelación se pesaron las muestras que fueron etiquetadas al inicio de la experimentación con los números 1, 2 y 3 para tener un control del peso de las muestras. La descongelación de las muestras se realizó a temperatura

ambiente (de 18 °C a 20 °C en la nave 2000 de la FES-Cuautitlán), cada una de las muestras se colocó dentro de una bolsa de polietileno (plástico) para evitar la condensación y fueron puestas sobre la rejilla de metal. Las muestras descongeladas al final de la experimentación fueron 9, de las cuales 3 de ellas tuvieron cada una un termopar durante la experimentación para monitorear las temperaturas dentro del centro térmico de las muestras, otras 3 muestras fueron destinadas para realizar el ensayo de penetración al final de la descongelación y las últimas 3 muestras corresponden a las etiquetadas como 1, 2 y 3 que fueron seleccionadas para registrar su peso después de cada etapa del proceso. Se consideraron descongeladas las muestras al llegar a 4 °C.

2.8 Ensayo de penetración y pérdida de peso

Consistió en introducir una longitud dada de un punzón de forma y tamaño definidos en el producto a analizar. El ensayo básico mide la fuerza necesaria para realizar esta penetración sobre el alimento. Se trata de uno de los dos ensayos más utilizados en el campo de los sólidos y semisólidos. Esto se debe a que presenta una similitud a la penetración de los dientes en un alimento. El ensayo de penetración se realiza colocando el alimento en una superficie plana y aplicando la fuerza con el penetrómetro sobre una cara del alimento que no presente bordes. La fuerza debe aplicarse de la misma fuente en los ensayos realizados durante la experimentación para tener el mismo valor de referencia aplicado. El esfuerzo normal se obtiene dividiendo la fuerza aplicada en el penetrómetro entre la superficie de contacto.

Para analizar la pérdida de peso se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{El \% de pérdida de peso} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (7)$$

P_i = peso inicial de las muestras frescas (g)

P_f = peso final de las muestras descongeladas (g)

2.9 Diseño experimental

Las variables independientes fueron: intervalos de temperaturas de congelación (factor A), tipos de congelación (factor B) y tipo de vegetal (factor C), estas variables ocasionaron que el valor del esfuerzo normal en los vegetales descongelados aumente o disminuya, que la velocidad de congelación sea rápida o lenta y que se presenten efectos en la pérdida de peso. Para analizar los efectos que provocaron las variables independientes sobre las variables de respuesta se decidió utilizar un diseño factorial 2^3 , con 3 repeticiones en cada tratamiento, lo que da un total de 24 corridas en la experimentación. La representación geométrica del experimento se muestra en la figura siguiente.

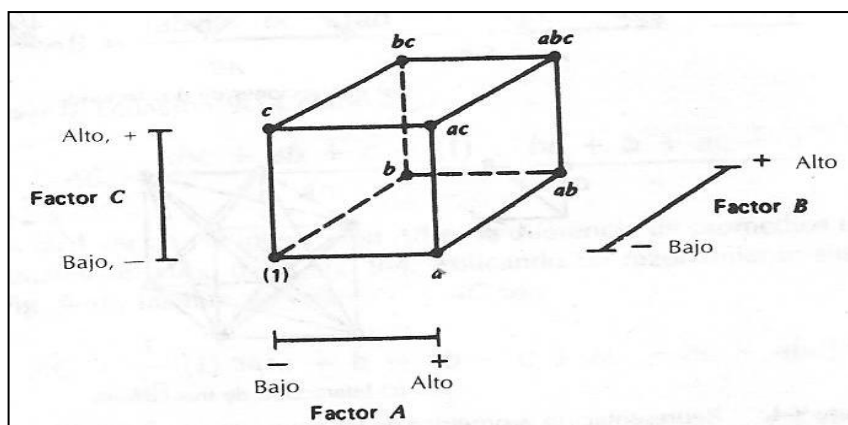


Figura 14. Diseño factorial 2^3 (Kuehl, 2001)

Los factores y sus niveles de variación se describen en la siguiente tabla:

Tabla 7. Factores experimentales

Variabes independientes	Niveles
1. Tipo de congelación	Mecánico-criogénico, Criogénico-mecánico
2. Intervalos de temperatura de congelación	10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C
3. Tipo de vegetal	Zanahoria Brócoli

CAPÍTULO III

TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Ensayo de penetración

El objetivo fue evaluar la influencia del proceso de la congelación mixta (mecánica-criogénica y criogénica-mecánica), mediante el ensayo de penetración, velocidad de congelación y pérdida de peso en zanahoria y brócoli. El análisis de los efectos de las variables independientes sobre los resultados del valor del esfuerzo normal es importante para encontrar los niveles de variación que permitan obtener valores altos del esfuerzo normal en los vegetales descongelados.

En las figuras 15 y 16 se muestran los resultados de esfuerzo normal para cada vegetal, la constitución morfológica del brócoli y de la zanahoria es muy diferente en cada tipo de vegetal. La cantidad de agua contenida en la estructura física del brócoli es alrededor del 90 % ligeramente más en comparación con la zanahoria que contiene 88,2 %. En ambos es importante la formación de pequeños cristales de agua debido a su alto contenido de ésta. Otro punto importante es el origen de cada uno, la zanahoria es una raíz y su estructura física es leñosa mientras que el brócoli es una planta formada por tallos carnosos y yemas florales con pedúnculos carnosos. La estructura carnosa del brócoli lo hace más sensible a los daños físicos que puede sufrir durante la congelación.

En la figura 15 se presentan los resultados del esfuerzo normal en las muestras de zanahoria, comparando los resultados de cada tratamiento los niveles más bajos corresponden a la congelación mecánica-criogénica. La figura 16 muestra los resultados del esfuerzo normal en brócoli, en muestras frescas, escaldadas y en las muestras que fueron congeladas con cada uno de los tratamientos. Se observan niveles bajos de esfuerzo normal en los resultados de los tratamientos de congelación criogénica-mecánica en comparación con las muestras frescas.

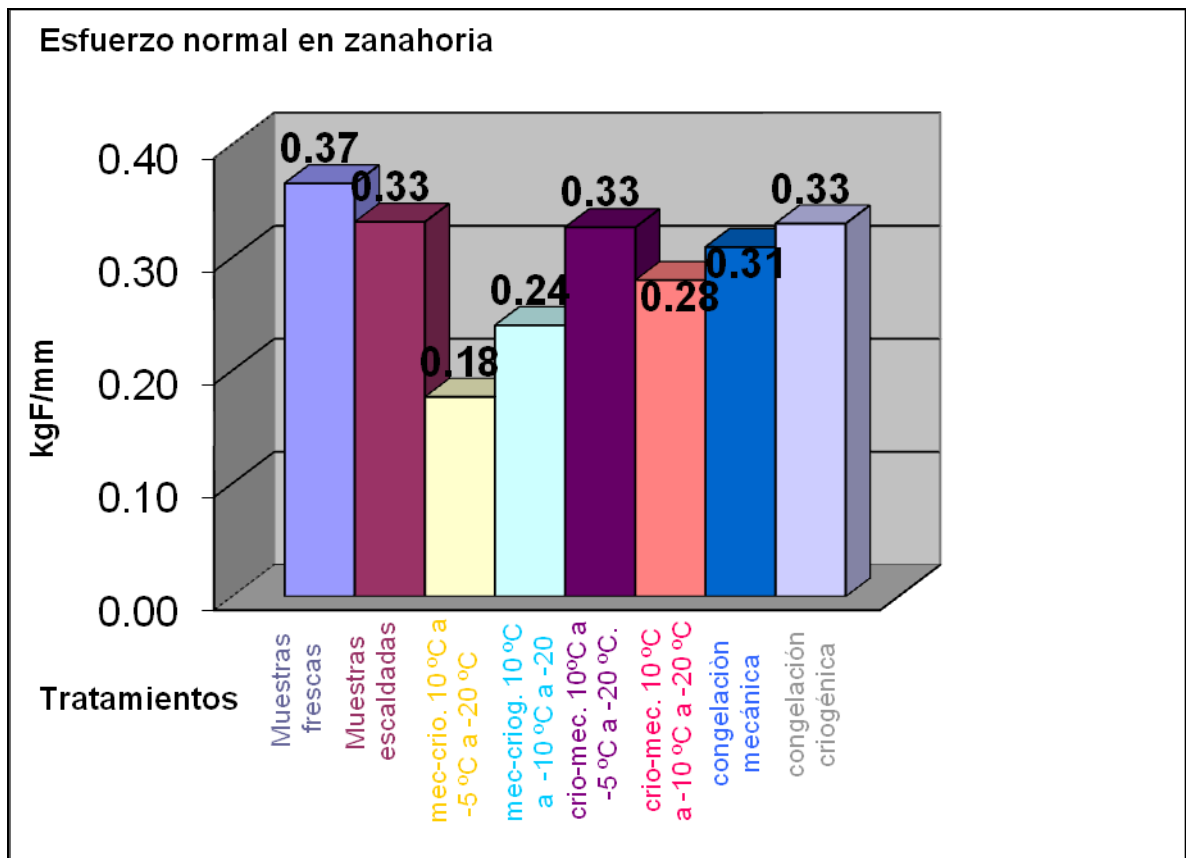


Figura 15. Comparación de resultados del esfuerzo normal en zanahoria

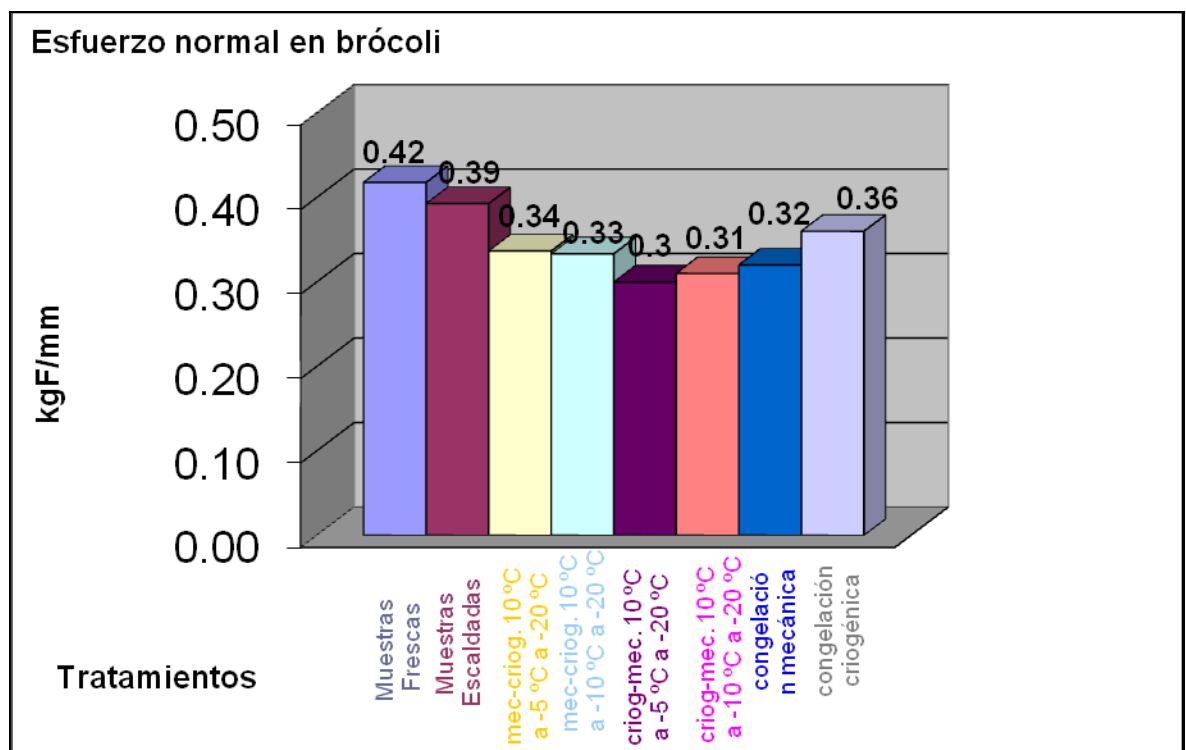


Figura 16. Comparación de resultados del esfuerzo normal en brócoli.

Casp (2003) menciona que la congelación es un sistema de conservación que puede afectar en determinado grado la calidad de los alimentos. Por lo tanto, es necesario estudiar los efectos que éste tratamiento tiene sobre la estructura de los productos, que van a presentarse como cambios en su textura y que serán determinantes en la vida media del producto después de ser descongelado. Existen alimentos que constituyen un sistema biológico organizado, provisto de una estructura celular ordenada, como pueden ser las frutas, las hortalizas, los tubérculos, las carnes, etc. También existen alimentos que no poseen una estructura celular organizada, como los jugos de frutas. Los primeros tienen el riesgo de sufrir los efectos perjudiciales de la congelación, ya que tienen estructuras que pueden verse dañadas por la aparición de los cristales de hielo.

El cuadro del lado izquierdo de la figura 17 muestra los resultados del esfuerzo normal en la interacción de ambos intervalos de temperaturas de congelación, al cambiar los tipos de congelación de mecánico-criogénico a criogénico-mecánico se incrementa el valor del esfuerzo normal. Mafart (1994) menciona que al quedar endurecido superficialmente de manera rápida, el producto es menos frágil y resiste mejor los cambios mecánicos, la zona periférica congelada rápidamente ejerce un papel protector contra la exudación y pérdida de aromas.

Cuando se congela aplicando los métodos de congelación con ambos intervalos de temperatura y se cambia el tipo de vegetal de zanahoria a brócoli se incrementa el valor del esfuerzo normal. Se observa que al tener el tipo de congelación constante ya sea mecánico-criogénico o criogénico-mecánico y cambiar el tipo de vegetal de zanahoria a brócoli, se aumenta el valor del esfuerzo normal.

En la figura 18 se presenta el efecto entre las temperaturas de congelación con el tipo de congelación y tipo de vegetal sobre los resultados de esfuerzo normal. Los dos niveles de variación que tiene cada variable de trabajo tienen diferente impacto en los resultados de esfuerzo normal.

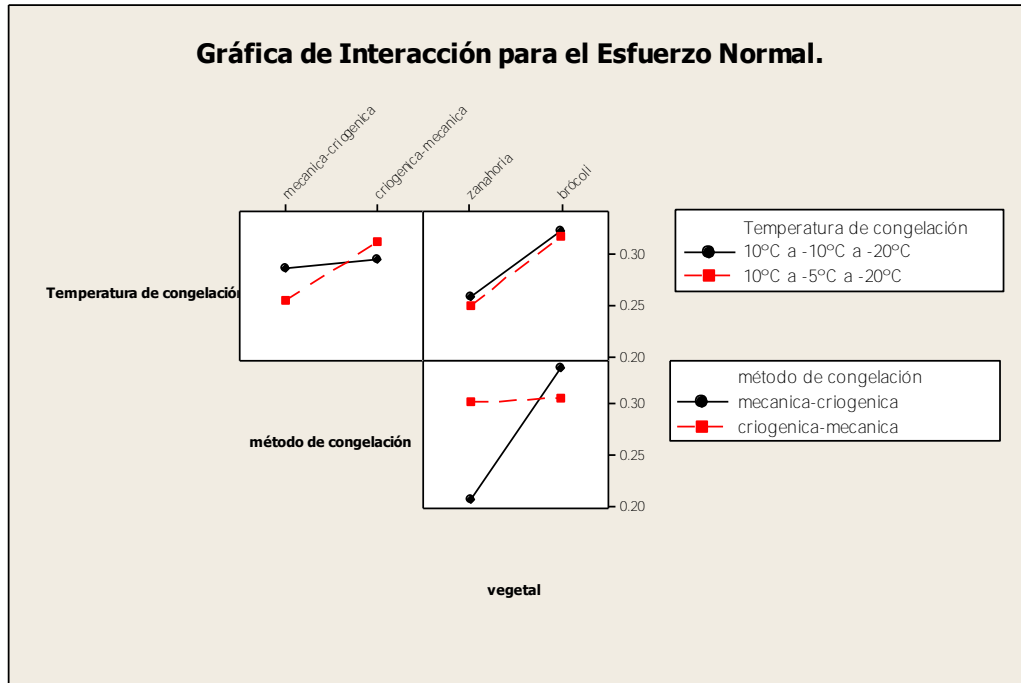


Figura 17. Interacción entre tipo de vegetal, tipo de congelación y temperaturas de congelación para los resultados de Esfuerzo Normal.

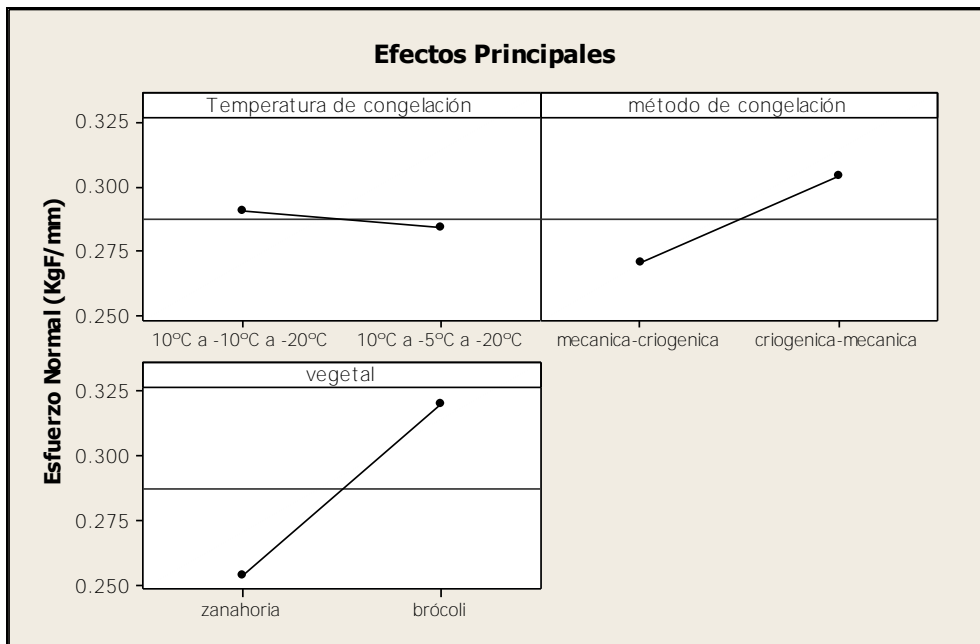


Figura 18. Efectos principales de las temperaturas de congelación, tipo de congelación y el tipo de vegetal.

Para conocer el factor de mayor efecto sobre las medias aritméticas del esfuerzo normal se analizaron los resultados en un cuadro de ANOVA. En la tabla 8 se muestra el análisis de varianza observándose que el valor de $p=0.046$ para el tipo de congelación es la variable de mayor influencia.

Tabla 8. ANOVA para los resultados de esfuerzo normal

FV	GL	SC	CM	F ₀	Valor-p
Vegetal	1	0.0277	0.0277	1.982	0.294
Forma de congelación	2	0.0280	0.0140	7.279	0.046
Temperatura de Congelación	4	0.0077	0.0019	1.067	0.405
Error	16	0.0288	0.0018		
Total	23	0.0923			

Para analizar el efecto de la congelación mecánica y criogénica de manera individual se utilizó un diseño factorial con dos factores cada uno y dos niveles de variación, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Niveles de variación

Factor	Niveles
1. Congelación	Mecánica Criogénica
2. Vegetal	Zanahoria Brócoli

En la figura 19 se presenta la interacción para el esfuerzo normal dónde se observa que al mantener constante el tipo de vegetal, zanahoria o brócoli y al cambiar el tipo de congelación de mecánico a criogénico se incrementa el valor del esfuerzo normal.

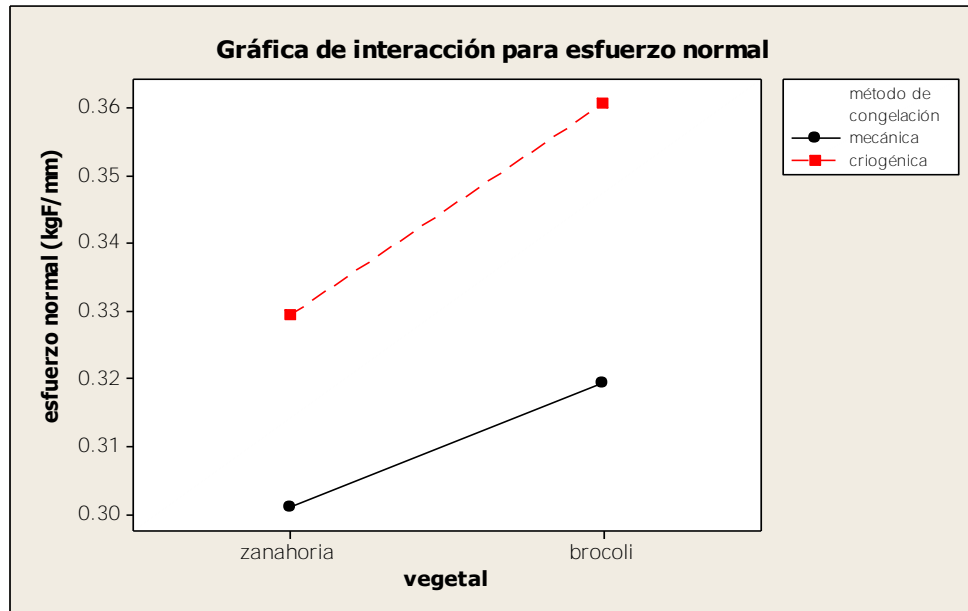


Figura 19. Interacción entre métodos de congelación y tipo de vegetal.

3.2. Pérdida de peso en vegetales

En la figura 20 se presenta la interacción entre los factores: intervalo de temperatura y tipo de congelación, al congelar zanahoria con la temperatura de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C al cambiar el tipo de congelación de criogénico-mecánico a mecánico-criogénico el porcentaje de pérdida de peso aumenta.

Durante la congelación de zanahoria al cambiar el tipo de congelación de criogénico-mecánico a mecánico-criogénico el porcentaje de pérdida de peso en zanahoria aumenta, por lo tanto al aplicar frío criogénico en la primera parte de la congelación se obtienen menores pérdidas de peso en las zanahorias. Madrid y col. (2003) explica que cuando el subenfriamiento se realiza criogénicamente, se reduce la carga térmica durante la congelación mecánica con aire. El tiempo de permanencia necesario en la parte de frío mecánico se reduce a la mitad si el producto entra a 0 °C en lugar de 20 °C.

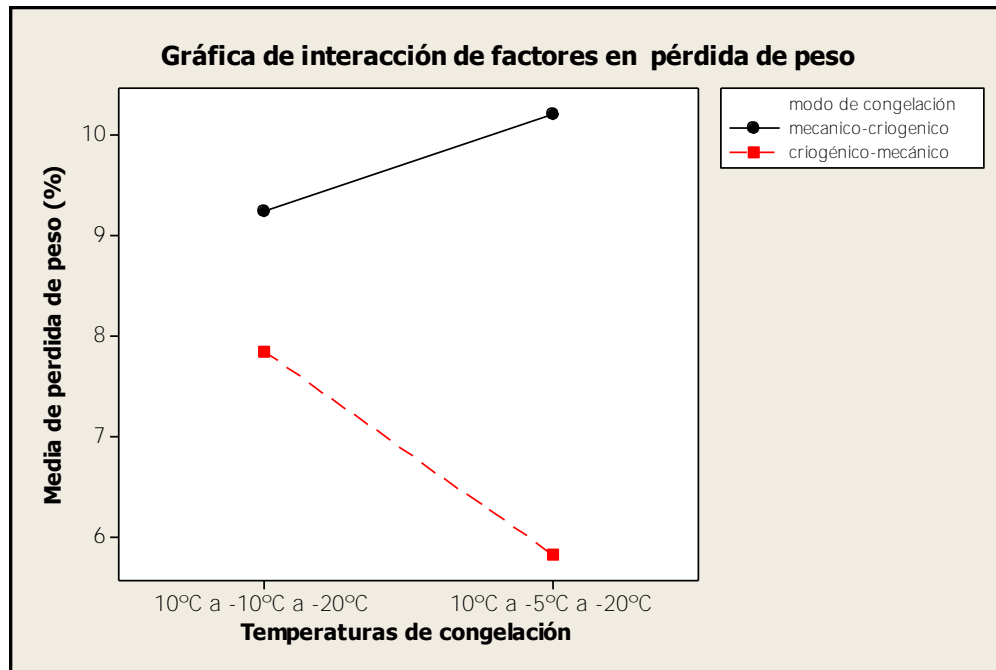


Figura 20. Interacción entre temperaturas de congelación y tipo de congelación sobre la pérdida de peso en zanahoria.

En la congelación de brócoli algunas de las muestras congeladas ganaron peso, en la figura 21 se presenta la gráfica mostrando los efectos de los factores sobre el aumento de peso en las muestras de brócoli, cuando se tienen constantes los intervalos de temperaturas de congelación y se cambian los tipos de congelación de mecánico-criogénico a criogénico-mecánico se presenta un mayor aumento de peso en las muestras de brócoli. El tipo de congelación criogénico-mecánico es el factor que más influencia tiene sobre el aumento de peso en las muestras de brócoli.

Para García (2003) la posibilidad de aplicar frío criogénico antes del mecánico permite congelar rápidamente la superficie de los productos alimenticios, evitando excesivas pérdidas de peso por deshidratación. En este caso para la congelación de brócoli no fue así, ya que al congelar rápidamente con frío criogénico no se tuvo un adecuado proceso de escurrimiento del agua fría utilizada sobre el brócoli después del escaldado para enfriar la verdura, esto pudo ocasionar un incremento en el peso final al descongelar las muestras.

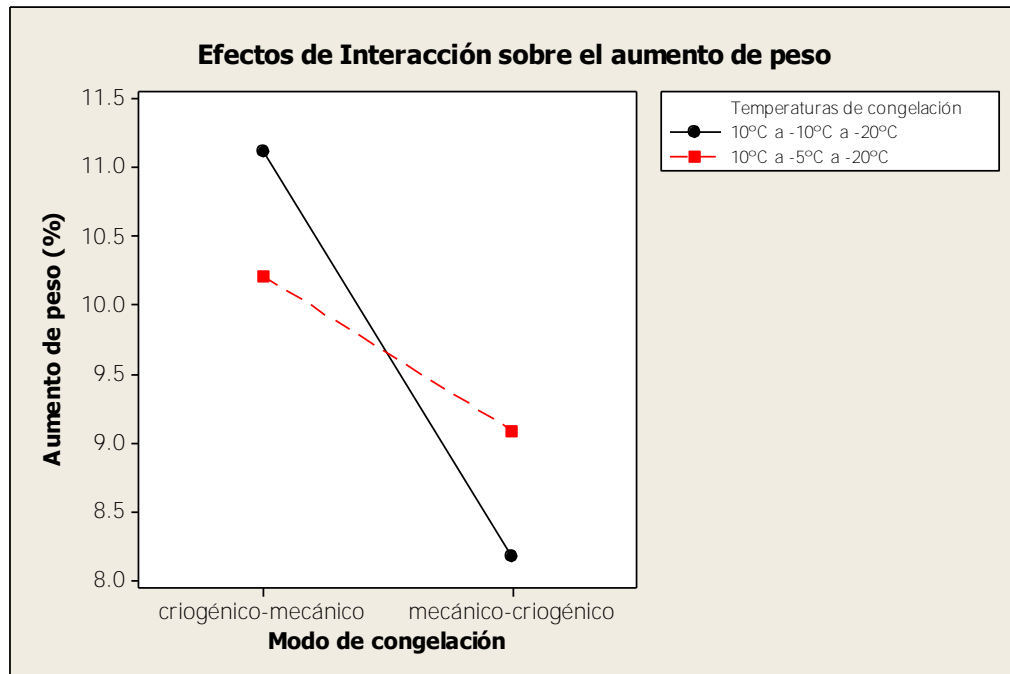


Figura 21. Interacción en el aumento de peso en brócoli.

3.3. Velocidad de congelación.

En la figura 22 se presenta la gráfica de interacción entre las variables: tipo de congelación, intervalo de temperatura de congelación y tipo de vegetal. En el cuadro de lado izquierdo al mantener constante los tipos de congelación y cambiar los intervalos de temperaturas de congelación de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C por las temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C la velocidad de congelación presenta un incremento. En el cuadro de la derecha al mantener constante cada uno de los tipos de congelación con brócoli se presentan bajas velocidades de congelación mientras que al congelar zanahoria aumenta la velocidad de congelación.

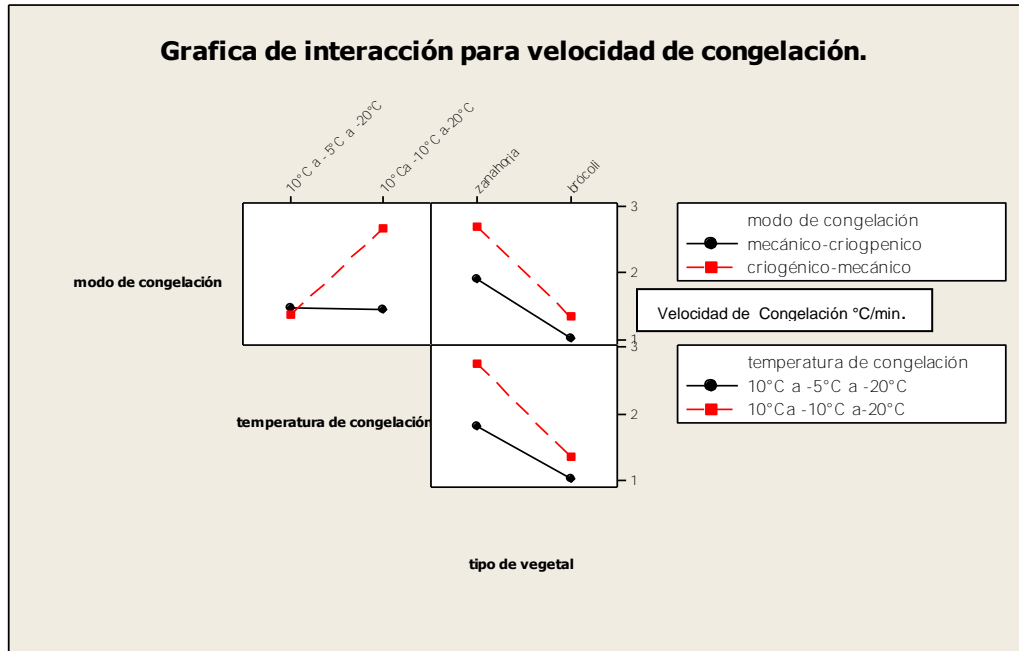


Figura 22. Interacción entre tipo de congelación, temperatura de congelación y tipo de vegetal con efectos en la velocidad de congelación.

En la siguiente gráfica de efectos principales, el tipo de congelación criogénico-mecánico incrementa la velocidad de congelación al igual que el intervalo de temperatura de congelación de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C.

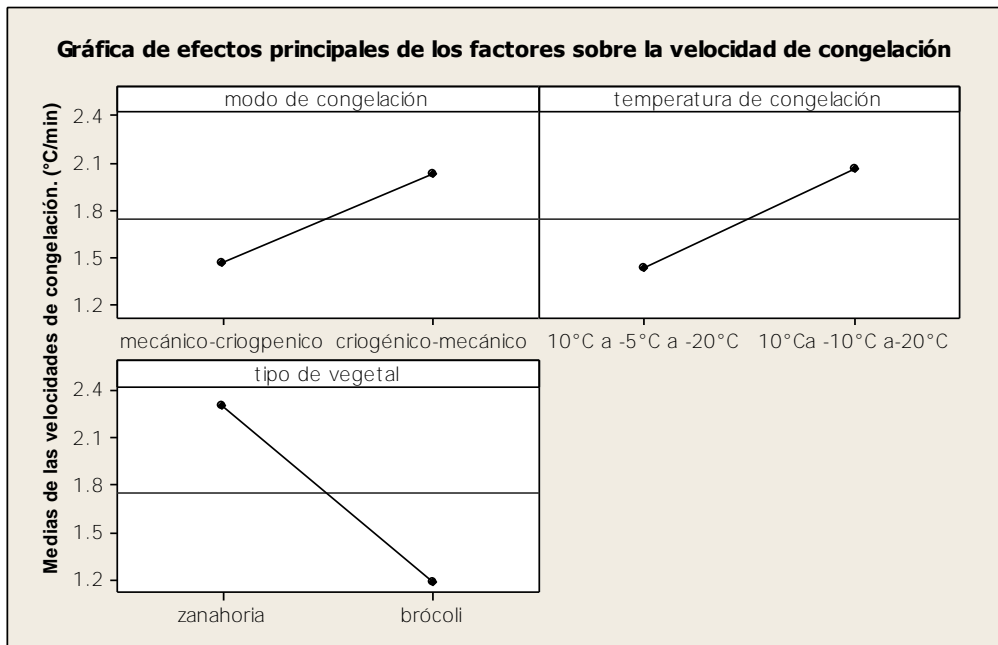


Figura 23. Efectos principales de los factores sobre la velocidad de congelación

Los resultados de velocidad de congelación se analizaron mediante un análisis de varianza para conocer que factor tiene mayor efecto sobre las medias aritméticas de la velocidad de congelación. En la tabla 10 del análisis de varianza se observa que el valor- $p=0.016$ para el tipo de vegetal es la variable de mayor influencia. Las diferencias entre ambos vegetales son varias, principalmente el contenido de agua que tienen en su estructura, el brócoli tiene alrededor de 90 % de agua mientras que la zanahoria 88,2 %. Además la estructura de los tejidos de ambos vegetales es diferente, la zanahoria es una raíz y el brócoli es una planta con estructura carnosa.

Tabla 10. ANOVA para los resultados de velocidad de congelación.

FV	GL	SC	CM	F ₀	Valor-p
Forma de congelación	1	1,87	1,8726	0,745	0,479
Temperatura de congelación	2	50274	2,5137	1,094	0,418
Tipo de vegetal.	4	9,1949	2,2987	4,219	0,016
Error	16	8,7175	0,5448		
Total	23	24,8124			

En la congelación criogénica-mecánica de zanahoria con rangos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C, la velocidad de congelación fue mayor en comparación con el tipo mecánico-criogénico. En los resultados obtenidos por Gamiño (2006) en la congelación de fresa por el método criogénico-mecánico menciona que el tiempo empleado en la etapa mecánica se reduce considerablemente cuando se emplea la congelación criogénica al inicio, ya que se alcanzan los -18 °C en tan sólo 19 min, en tanto que en la congelación mecánica el tiempo empleado fue de 154 min. Durante la congelación de brócoli y zanahoria empleando el tipo de congelación criogénico-mecánico con rangos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C, se redujo el tiempo de congelación en ambos vegetales; en brócoli se obtienen niveles óptimos de esfuerzo normal y en zanahoria éstos valores son decrecientes, lo que indica un ablandamiento en la textura de éste vegetal.

La tabla 11 muestra los resultados de velocidades de congelación para cada uno de los tratamientos, éste valor resulta al restar la temperatura inicial y la temperatura final de congelación, entre el tiempo que dura la etapa de congelación en minutos. Aguado (2002) reporta que velocidades superiores a 5 °C/min suponen una congelación rápida, valores inferiores a 1 °C/min una congelación lenta. El tipo de congelación criogénica-mecánica presento mayor velocidad de congelación utilizando el intervalo de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C durante la congelación de zanahoria y brócoli.

Tabla 11. Valores de medias aritméticas de velocidad de congelación en °C/min.

Tipo de velocidad	10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C	10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C	
mecánica-criogénica	1,92	1,82	Zanahoria
criogénica-mecánica	1,69	3,26	Zanahoria
Mecánica-criogénica	1,01	1,03	Brócoli
criogénica-mecánica	1,02	1,64	Brócoli

En la tabla 12 se presentan las velocidades de congelación obtenidas con los métodos de congelación mecánico y criogénico en zanahoria y brócoli. El método criogénico congeló los vegetales con rápida velocidad de congelación y debido a la forma y al peso de las muestras las zanahoria obtuvieron mayor velocidad de congelación.

Tabla 12. Resultados de velocidad de congelación mecánica y criogénica (°C/min).

Tipo de velocidad	Brócoli	Zanahoria
Congelación mecánica	0,89	1,31
Congelación criogénica	2,30	9,96

3.4 Congelación

Las siguientes figuras muestran los rangos de temperatura que se registraron durante las etapas mecánica y criogénica del proceso de congelación de zanahoria y brócoli.

La figura 24 muestra la congelación mecánica-criogénica de zanahoria con intervalos de temperaturas de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C. La temperatura desciende lentamente por la zona crítica de congelación de 0 °C a -5 °C a una velocidad de 1,45 °C/min. La etapa de congelación criogénica aplicada para descender la temperatura de -5 °C a -20 °C presenta velocidad de congelación rápida de 8,48 °C/min debido a que se utilizó frío criogénico en esta parte del proceso.

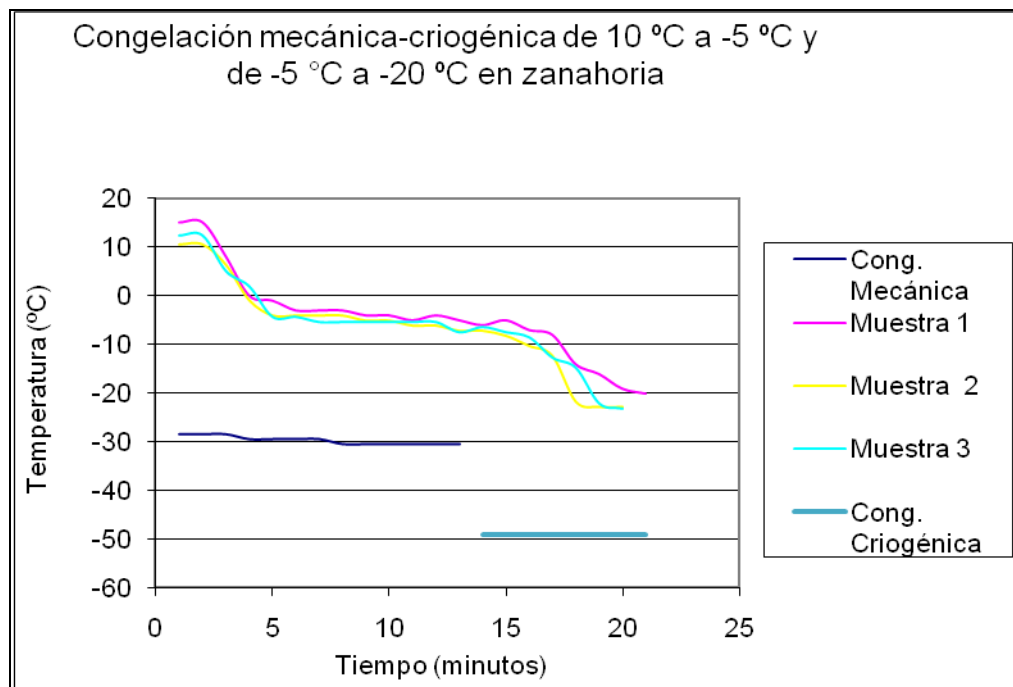


Figura 24. Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperaturas de congelación de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C en zanahoria.

En la figura 25 se observa la gráfica de congelación mecánica-criogénica utilizando los intervalos de temperatura de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C, en la primera etapa del proceso se aplicó la congelación mecánica en la cámara de congelación, se tuvo una velocidad de congelación de 0,80 °C/min, la cual se considera velocidad lenta de congelación. La segunda parte de la congelación se realizó con criogenia y tuvo una velocidad de congelación de 2,52 °C/min, aunque ésta velocidad no se considera rápida. Valores de velocidad superiores a 5 °C/min suponen una congelación rápida, valores inferiores a 1 °C/min denotan una congelación lenta y entre ambos valores se dan situaciones intermedias.

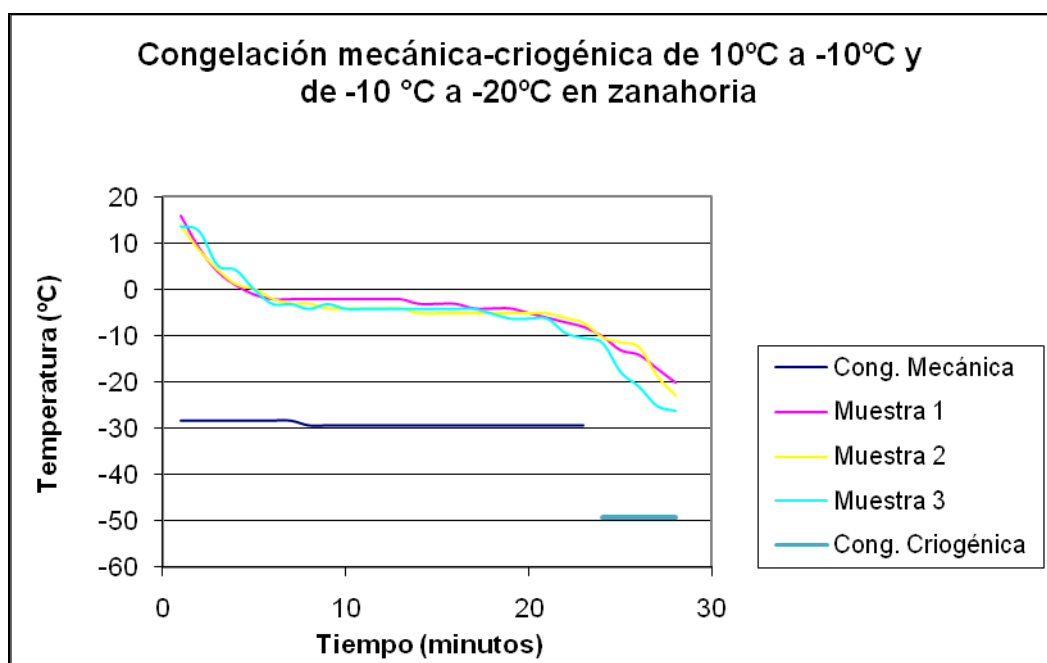


Figura 25. Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C.

La figura 26 muestra la gráfica de temperaturas de congelación del método criogénico-mecánico con temperaturas de congelación de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C, en la primera etapa de la congelación con frío criogénico (hielo seco) se tuvo una velocidad de 3,79 °C/min. Para continuar con la segunda etapa de congelación se utilizó frío mecánico para bajar la temperatura de -5 °C a -20 °C, se alcanzó una velocidad de

congelación de 1,39 °C/min. Este cambio de temperatura en el medio de congelación ocasiona un calentamiento en las muestras y una posible recrystalización.

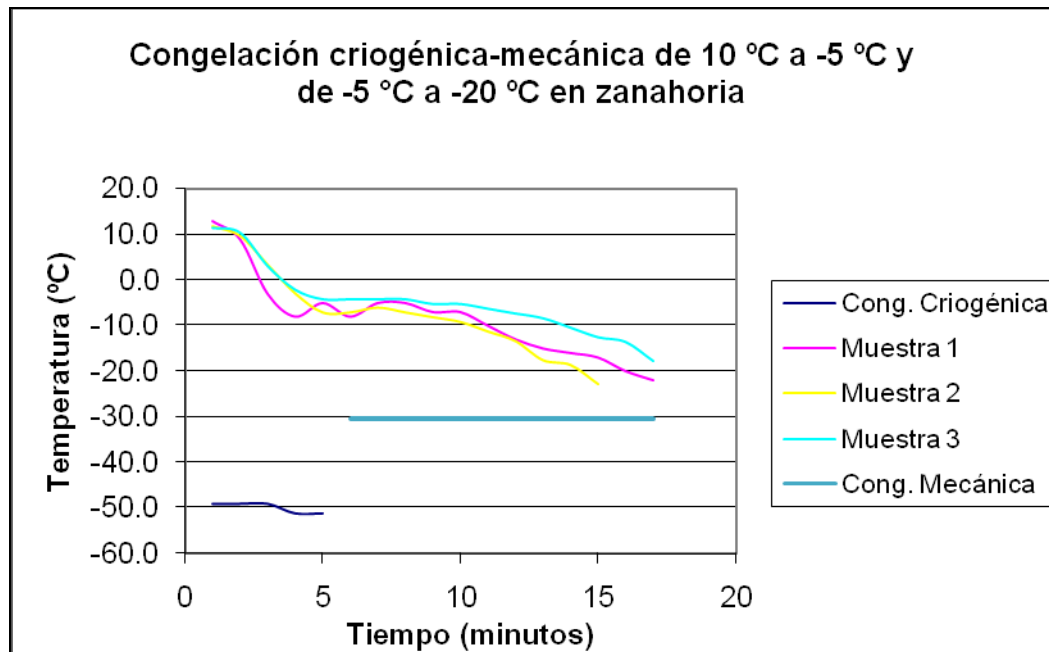


Figura 26. Temperaturas de congelación criogénica-mecánica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C.

En la figura 27 se muestra la gráfica de congelación de zanahoria con el método criogénico-mecánico, en la primera etapa el intervalo de temperatura fue de 10 °C a -10 °C con una velocidad de congelación de 4,19 °C/min con frío criogénico (hielo seco). En la siguiente etapa el intervalo de temperatura fue de -10 °C a -20 °C, con una velocidad de congelación de 2,88 °C/min, se utilizó congelación mecánica y en la gráfica se observa que durante esta etapa la temperatura continúa bajando de forma rápida durante la etapa de congelación con aire frío en la cámara de congelación (congelación mecánica).

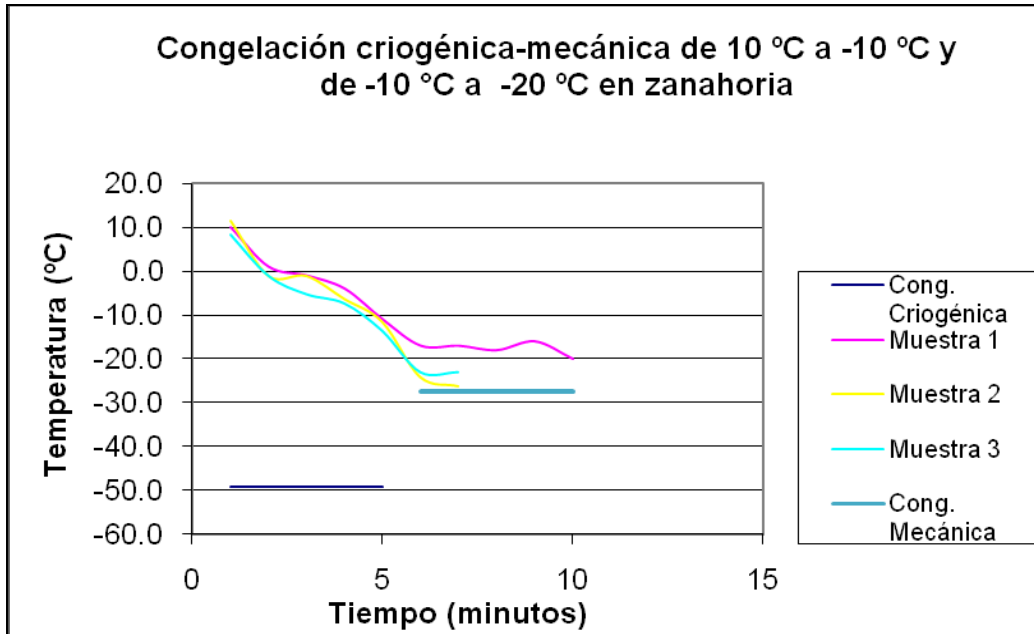


Figura 27. Temperaturas de congelación criogénica-mecánica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C en zanahoria.

En la congelación mecánica con aire frío se tuvo una velocidad de 1,36 °C/min considerada como congelación lenta, la gráfica de congelación está representada en la figura 28.

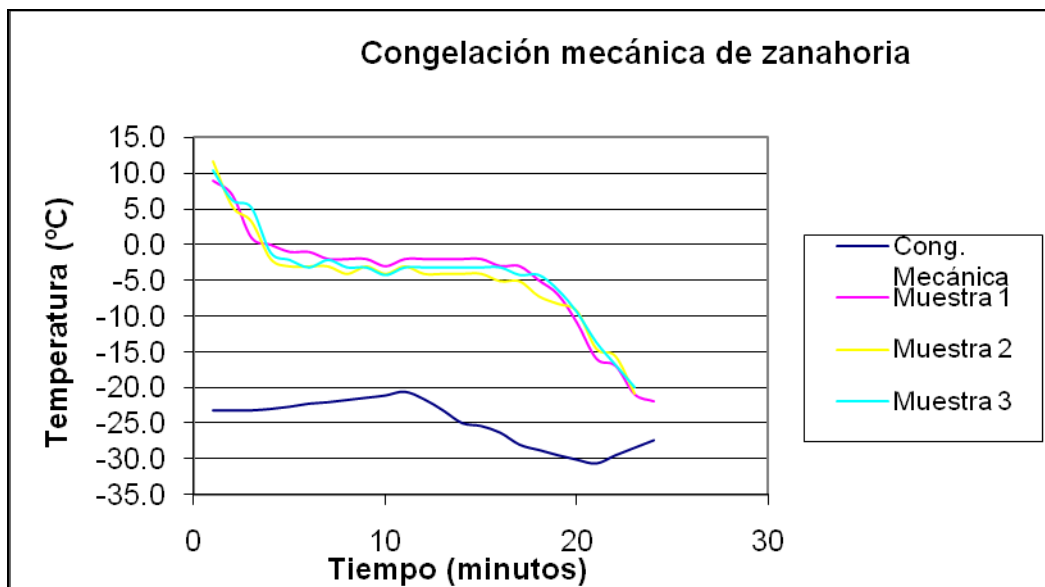


Figura 28. Temperaturas de congelación mecánica de zanahoria.

La velocidad de congelación durante el método criogénico fue 6,19 °C/min. En la figura 29 se observa la rápida velocidad de congelación durante la zona crítica donde se forman los núcleos que serán los cristales de hielo, al pasar rápido por la zona crítica se forman pequeños cristales de hielo, el agua no sale de las células, no se presenta exudación en las rodajas de zanahoria descongeladas y la textura del vegetal se conserva mejor.

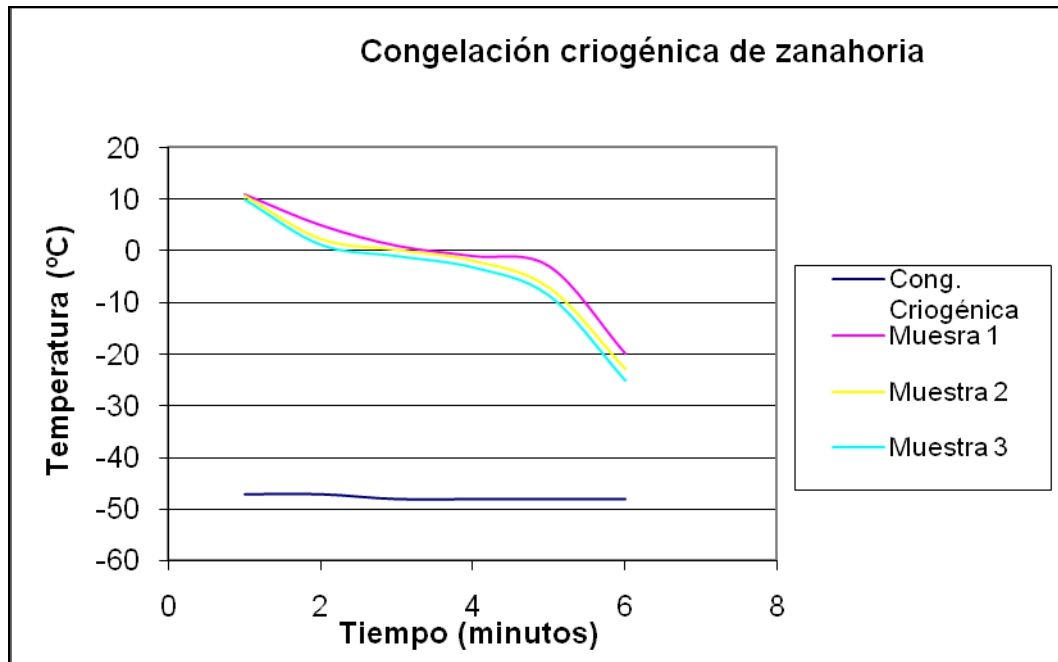


Figura 29. Temperaturas de congelación criogénica de zanahoria.

En la figura 30 se presenta la gráfica del tipo de congelación mecánico-criogénico en brócoli. En la primera etapa de congelación mecánica en el rango de temperatura de 10 °C a -5 °C se tuvo una velocidad de congelación de 0,6 °C/min, en la segunda etapa se utilizó frío criogénico para bajar la temperatura de -5 °C a -20 °C y se obtuvo una velocidad de 2,57 °C/min.

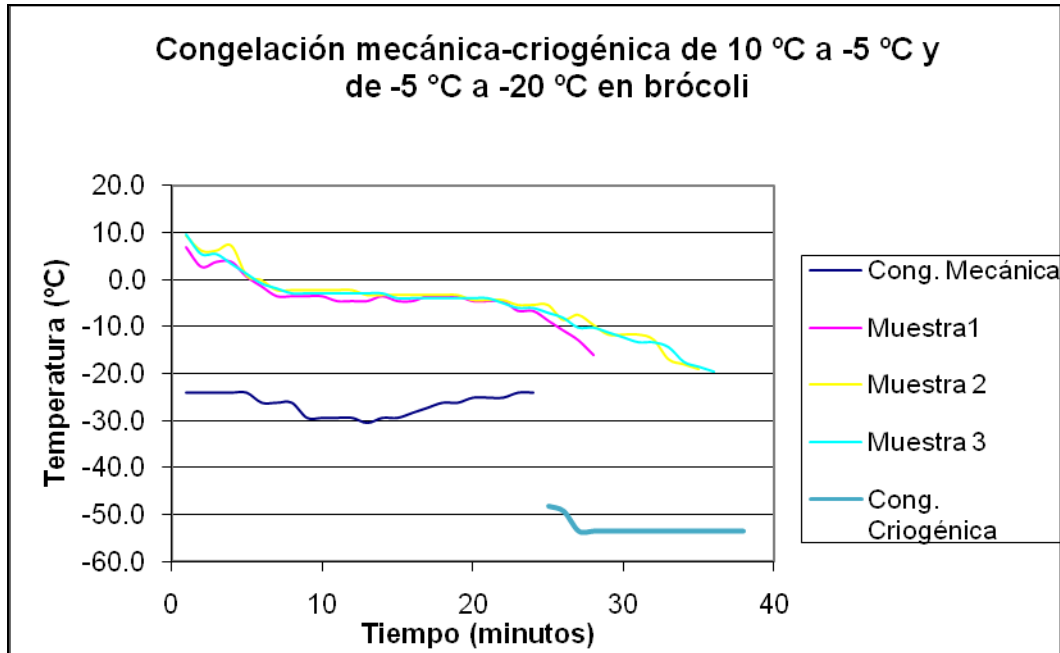


Figura 30. Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C para brócoli.

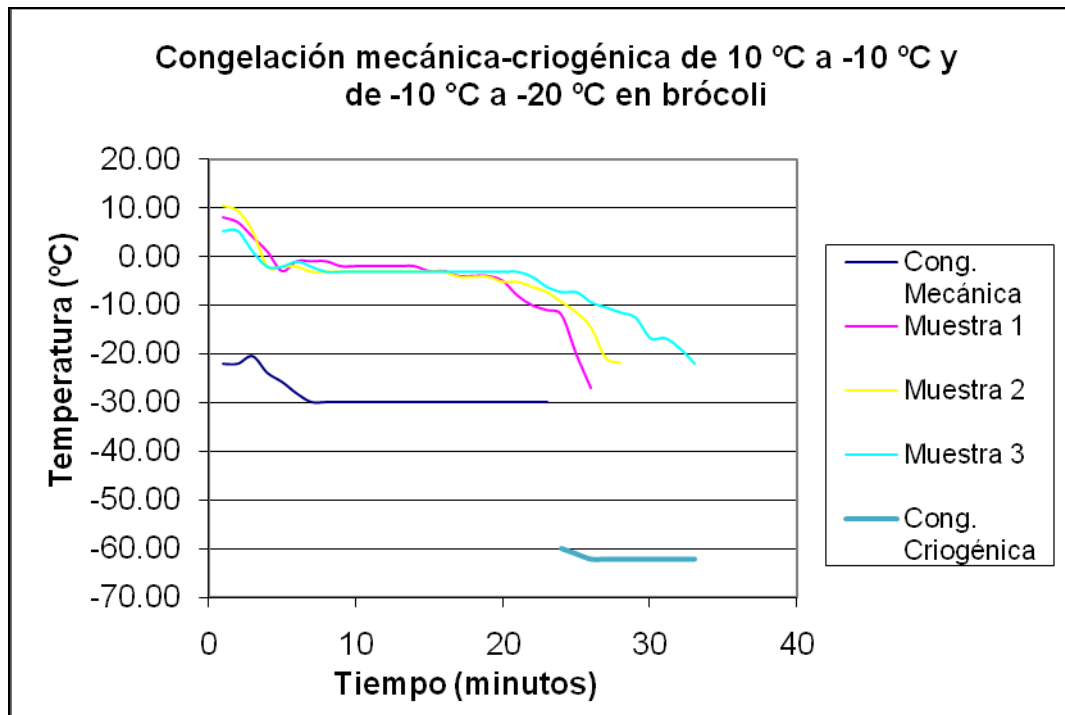


Figura 31. Temperaturas de congelación mecánica-criogénica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C para brócoli.

La figura 31 muestra la gráfica de temperaturas de congelación mecánico-criogénico, la primera de etapa se aplicó el método mecánico para bajar la temperatura de las muestras de 10 °C a -10 °C con una velocidad de congelación de 0,76 °C/min. La segunda etapa de congelación se realizó con el método criogénico y la temperatura descendió de -10 °C a -20 °C, en ésta etapa se alcanzó una velocidad de 3,37 °C/min.

La figura 32 presenta la gráfica de congelación del tipo criogénico-mecánico en brócoli. En la primera etapa se congeló con el método criogénico para descender la temperatura de 10 °C a -5 °C, la velocidad en ésta etapa fue de 2,64 °C/min. Para la segunda etapa del proceso se utilizó congelación mecánica con una velocidad de 0,69 °C/min en el intervalo de temperatura de -5 °C a -20 °C. Al cambiar el método de congelación de criogénico a mecánico se presenta un aumento en la temperatura de las muestras lo que puede ocasionar una re cristalización en el brócoli.

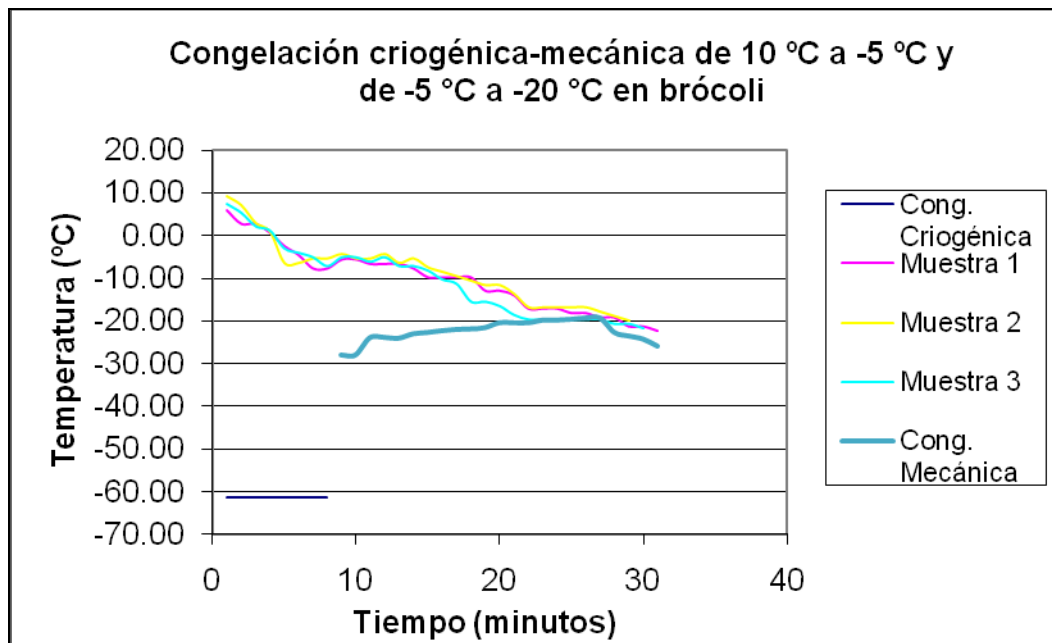


Figura 32. Temperaturas de congelación criogénico-mecánica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -5 °C y de -5 °C a -20 °C para brócoli.

La figura 33 muestra la gráfica de temperaturas de congelación del tipocriogénico-mecánico con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C. El método criogénico aplicado en la primera etapa hizo descender la temperatura inicial de congelación de 10 °C hasta llegar a -10 °C con una velocidad de congelación de 3,55 °C/min, mientras en la segunda etapa con el método mecánico la velocidad de congelación fue de 1,26 °C/min en el intervalo de temperatura de -10 °C a -20 °C. En la gráfica de la figura 33 se observa un incremento en la temperatura al cambiar el tipo de congelación de criogénico a mecánico. Este cambio de temperatura según la bibliografía ocasiona en las muestras una re cristalización migratoria (Fellows, 1994)

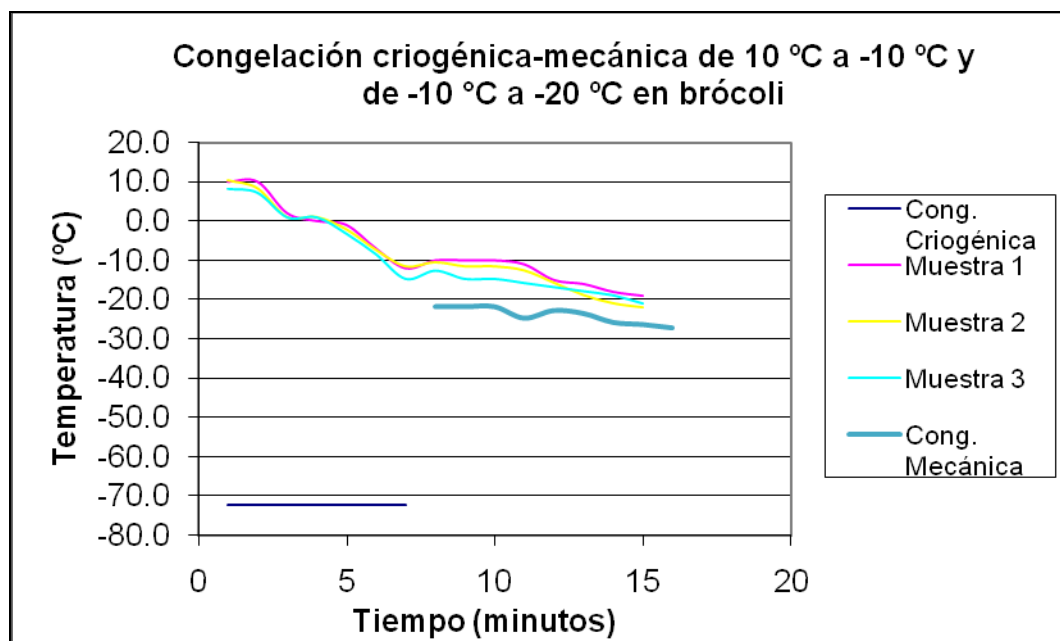


Figura 33. Temperaturas de congelación criogénica-mecánica con intervalos de temperaturas de 10 °C a -10 °C y de -10 °C a -20 °C para brócoli.

En la figura 34 se presentan las temperaturas de congelación para el método mecánico de brócoli. La velocidad de congelación con éste método fue de 0,95 °C/min, una velocidad lenta en comparación con la velocidad de congelación con el método criogénico que se muestra en la figura 35.

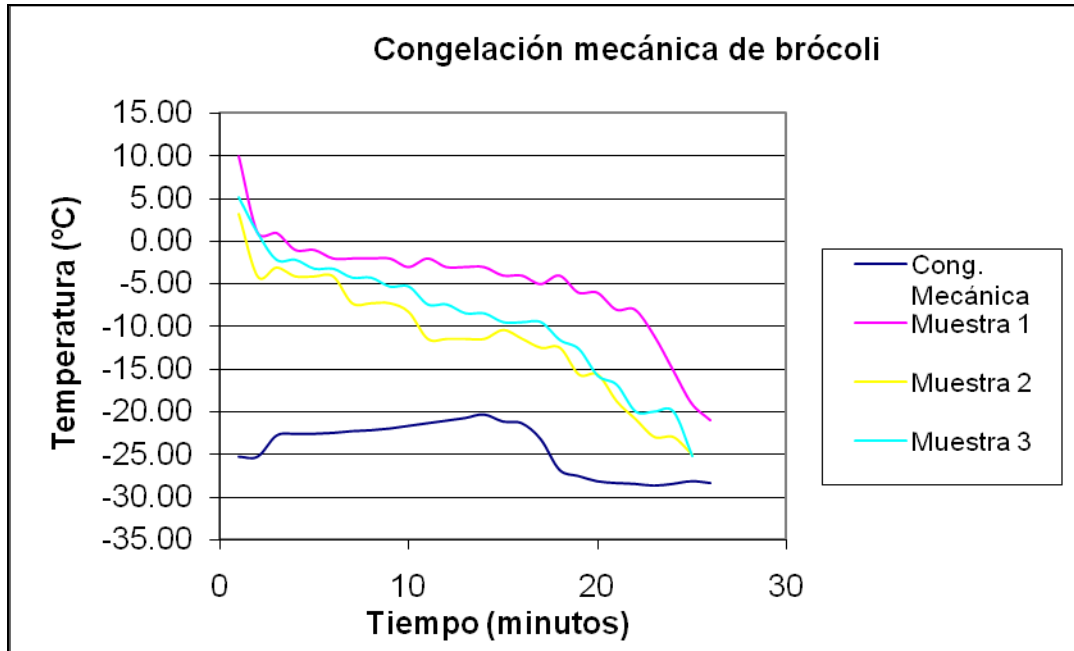


Figura 34. Temperaturas de congelación mecánica de brócoli.

Las temperaturas de congelación criogénica en brócoli se presentan en la figura 35. La velocidad de congelación registrada fue de $3,37\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, éste valor está por arriba de las velocidades de congelación lenta.

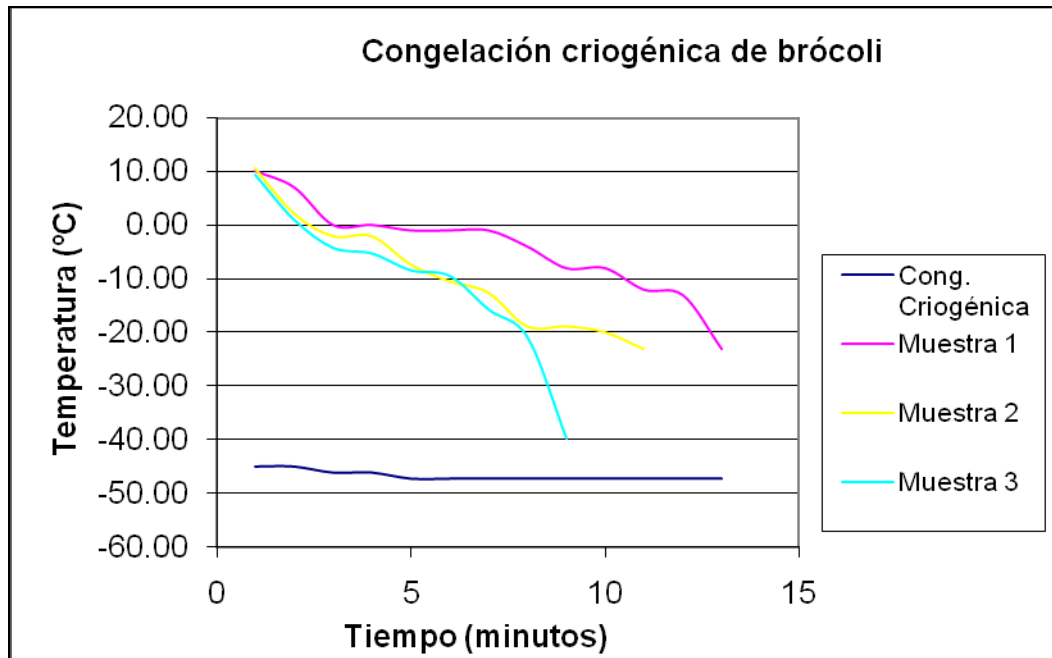


Figura 35. Temperaturas de congelación criogénica de brócoli.

CONCLUSIONES

La congelación mixta: mecánica-criogénica y criogénica-mecánica, tuvo influencias positivas al obtener resultados de esfuerzo normal cercanos a los registrados en muestras frescas y al reducir la pérdida de peso en las muestras de brócoli y zanahoria descongelados, sin embargo también se presentaron resultados desfavorables en valores de esfuerzo normal menores a los de muestras frescas y aumentos en la pérdida de peso en vegetales descongelados.

La congelación mecánica-criogénica resultó ser favorable durante la congelación de brócoli, los valores de esfuerzo normal obtenidos fueron similares a las muestras en fresco al utilizar ambos intervalos de temperatura, esto permitió obtener una textura firme en las muestras descongeladas además de reducir la pérdida de peso en dichas muestras; mientras que en zanahoria no hubo un beneficio favorable al utilizar este método, los valores de esfuerzo normal indican una pérdida de firmeza en la textura ocasionando pérdida de peso en las muestras, esto debido a la velocidad de congelación lenta registrada durante la congelación mecánica en la primera etapa del proceso.

Con el tipo de congelación criogénico-mecánico en zanahoria, aplicado con ambos rangos de temperatura, los resultados de esfuerzo normal en muestras descongeladas fueron muy cercanos al valor en muestras frescas y la pérdida en peso tuvo los más bajos niveles registrados, mientras que en brócoli, se obtuvieron valores de esfuerzo normal muy similares a los obtenidos en la congelación mecánica-criogénica y fue mayor el aumento de peso en las muestras de brócoli.

Los dos tipos de congelación mixta resultaron ser una buena opción para congelar brócoli, no así para la zanahoria, ya que sólo con la congelación criogénica-mecánica se obtuvieron valores de esfuerzo normal cercanos a los valores en muestras frescas, lo que indica mejor apariencia y firmeza en textura y con la menor pérdida de peso.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, J. (2002). Ingeniería de la industria alimentaria volumen III: Operaciones de conservación en alimentos. España: Editorial Síntesis.
- Aguilar, C., De la Luz, M., De la Garza, H., Contreras, J. (1999). Aspectos bioquímicos de la relación entre el escaldado TB-TI y la textura de vegetales procesados. *Journal of the Mexican Chemical Society*, Marzo-abril, 43 (002), 54-62.
- Arthey, D. (1992). *Procesado de hortaliza*. España: Acribia.
- Brennan, J. (2008). *Manual del procesado de los alimentos*, España: Acribia.
- Burley, A., Hess, M., Howei, F., Coleman, A. (1982). The nicrosil nisil thermocouple: A critical comparison with the ANSI standard letter-designated base-metal thermocouples. *American Institute of Physics*. (5) 1159-1166.
- Casp, A., Abril, J. (2003). *Procesos de conservación de alimento*, (2ª.ed.). España: Mundi-Prensa.
- Claude, R. (2004). *Reología y análisis de la textura de los alimentos*. España: Acribia.
- Creus, A. (2006). *Instrumentación industrial*, (7a. ed.). España: Alfa Omega.
- Fachmann, K. (1991). *Tablas de composición de alimentos*. España: Acribia.
- Fellows, P. (1994). *Tecnología del procesado de los alimentos: Principios y prácticas*. España: Acribia.
- Gallardo, M. (2004). *Validación experimental de un software asistido por internet para describir el proceso combinado escaldado – hidrogenfriado en floretes de brócoli*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, Universidad Austral de Chile, Valdivia-Chile.

- Gamiño, Z., Rosales, H., Bautista, M., García, C.(2006). Congelación de fresas por el método mixto criogénico y mecánico. *Industria Alimentaria*. Mayo-junio 2006, 24-32.
- García Montoya, Encarnación (2001). Optimización, validación y modelización de un proceso de fabricación de comprimidos. Desarrollo de una aplicación interactiva multimedia. Tesis Doctoral de la Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona, España.
- García, W.(2003, Agosto). Las armas del frío. *Alimentos Argentinos*. Disponible en: www.alimentosargentinos.gov.ar/0-3/revistas/r_08/08_03_ultra.htm. [2010, Diciembre].
- González González, Claudio (2005). Validación retrospectiva y control estadístico de procesos en la industria farmacéutica. Tesis de Licenciatura en Químico Farmacéutico. Universidad de Chile. Chile.
- Gooseff, A. (1988). Industrial food freezing systems. International Institute of Ammonia Refrigeration 10th Annual Meeting. Savannah, Georgia.
- Gruda, Z., Postolski, J. (1974). *Tecnología de la Congelación de Alimentos*. España: Acribia.
- Instituto Internacional del Frío (1990). *Alimentos congelados, procesado y distribución*. España: Acribia.
- Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C. NMX-Z-055-IMNC-2009 Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología.
- International Instituted of Ammonia Refrigeration (1980). Technical paper #1. Energy cost comparisons-cryogenics vs. mechanical freezing systems. Washington, D.C .
- Kilcast, D. (2004). *Texture in food volume II: Solid foods*. England: Woodhead Publishing Limited.

- Kuehl, R. (2001). Diseño de experimentos (2a. ed.). México: Thomson Learning.
- Lerena, C. y Lerena, J. (1998). Manual de enfriado, congelación y descongelación de los alimentos. Argentina: Assistance Food Argentina S.A.
- Madrid, A., Gómez, J., Santiago, F., Madrid, V., Madrid, C. J. (2003). Refrigeración, congelación y envasado de los alimentos. España: Mundi Prensa.
- Mafart, P. (1994). Ingeniería industrial alimentaria I. Procesos físicos de conservación. España: Acribia.
- Ministerio de Salud Pública (1994). Cuba: Centro para el Control Estatal de la Calidad de los Medicamentos. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/203524962/validacion-retrospectiva>. [2014, 19 de octubre].
- Pearson, Andy (2009). Technical paper #5. Calculating freezing times in blast and plate freezers. International Institute of Ammonia Refrigeration. Dallas, Texas.
- Potter, N. (1999). La ciencia de los alimentos. México: Acribia.
- Ramaswamy, H. y Marcotte, M. (2006). Food processing principles and applications. USA: Taylor & Francis Group.
- Ramírez, Castellanos A. (2009). Exactitud y Precisión. Centro de Servicios de Alta Tecnología. Disponible en: http://www.upaep.cesat.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=28:exactitud-y-precision&catid=11:metrologia&Itemid=14. [2010, Diciembre].
- Rosenthal, A. (2001). Textura de los alimentos, medida y percepción. España: Acribia.

SAGARPA.Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Disponible en:http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=2 . [2011, Diciembre].

Sharma, S., Mulvaney, S., Rizvi, S. (2003). Ingeniería de alimentos. México: Limusa Wiley.

Tirilly, Y., y Bourgeois, M. (2002).Tecnología de las hortalizas. España: Acribia.

The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) Part 2: Techniques and thermometers traceable to the international temperature scale of 1990. Canada. Metrologia Springer Verlag,

Uquiche, C. E., Cisneros-Zevallos, L.(2002).Efecto del escaldado y recubrimiento higroscópico sobre la calidad de zanahorias (*Daucus carota*, *Var. Chanrenay*) precortadas durante el almacenamiento. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 54 (2) pp. 187-192.

Wills, R.H.H. (1990).Fisiología y manipulación de frutas y hortalizas post-recolección. España: Acribia.

APÉNDICE

Apéndice 1. Resultados de la Validación de Termopares

La ecuación que se ajustó para las temperaturas obtenidas desde el punto inicial de temperatura hasta el punto de ebullición para la validación de termopares fue una ecuación de 4º orden y para la etapa de temperatura constante se aplicó una ecuación lineal.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de desviación estándar (S), coeficiente de variación (C.V.) y el valor de R^2 para cada termopar.

Tabla 1. Resultados de validación de termopares

Termopar	media	Desviación estándar	Coficiente de variación	R^2
1	63.1290	25.4516	40.3168	0.9994
2	67.0323	26.3597	39.3239	0.9967
3	67.2581	26.4474	39.3223	0.9976
4	68.0645	26.2475	38.5626	0.9963
5	67.3871	26.4735	39.2857	0.9969
6	67.7419	26.2995	38.8231	0.9967

Tabla 2. Cuadro de atributos de termopares

Termopar	S	C.V.	R ²	Total
1	VI	I	VI	13
2	III	II	II	7
3	II	III	V	10
4	V	VI	I	12
5	I	IV	IV	9
6	IV	V	III	12

Se asignó el valor más alto (VI) en la tabla de atributos al termopar que obtuviera el mejor valor para desviación estándar (S), coeficiente de variación (C.V) y R².

Como resultado se seleccionó el número 1.