



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

## **Efecto de la aplicación de un criogel en las características de color y resistencia al corte de lomo de cerdo.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

**YEUDIÉL ALEXIS RAMÍREZ PUENTE**

ASESORES:

Dr. José Luis Arjona Román

Dra. Rosalía Meléndez Pérez

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



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  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de 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**

Efecto de la aplicación de un criogel en las características de color y resistencia al corte de lomo de cerdo.

Que presenta el pasante: **Yeudiel Alexis Ramirez Puente**  
Con número de cuenta: **413111184** 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**

**ATENAMENTE**  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de Octubre de 2018.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dr. José Luis Arjona Román	
<b>VOCAL</b>	I.A. María Guadalupe López Franco	
<b>SECRETARIO</b>	I.A. Ana María Sabina De la Cruz Javier	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Maritza Rocandio Pineda	
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Jonathan Coria Hernández	

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

LMCF/cga\*

Agradecimiento al DGAP-UNAM  
por el apoyo financiero al proyecto  
clave IT201417, IT20314 y PIAPI  
1820.

## Agradecimientos

A **Dios** por darme oportunidad de llegar hasta aquí, y darme la capacidad para afrontar cada reto que se me presente.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por permitirme ser parte de la máxima casa de estudios y brindarme siempre las facilidades para poder desarrollarme académica y profesionalmente, que hoy finaliza con un logro más.

Al **Dr. José Luis Arjona** por el apoyo y el tiempo en el desarrollo de este proyecto, por siempre compartir un poco de todos sus conocimientos, ayudando a ver más fácil la ingeniería, sin duda uno de los mejores maestros de la universidad.

A la **Dra. Rosalía Meléndez** por ser mas que solo una profesora, por siempre escucharme, por todas sus atenciones, por enseñarme a darle valor a las cosas que realizamos por más simples que parezcan y por siempre estar al pendiente de las necesidades para que este proyecto se realizara de manera sencilla y por crear un gran ambiente de trabajo.

A la **Dra. Marta Rosas** por las risas y conocimiento compartido durante el taller, por sus consejos y apoyo para realización de este trabajo.

Al **M. en C. Jonathan Coria** por siempre tener la disponibilidad de ayudarme en lo que necesité durante el proyecto, por los consejos y apoyo durante el desarrollo del mismo y por el tiempo dedicado para su revisión.

A mis sinodales **I. A. María Guadalupe López, I. A. Ana de la Cruz, I. A. Maritza Rocandio** por dedicar tiempo en la revisión de este trabajo y por su ayuda y consejos.

En general gracias a cada uno de mis maestros, de cada uno de ellos me llevo algo, y son parte de este logro.

## Dedicatorias

A mis padres **Javier Ramírez y Amalia Puente**, por su amor incondicional, por enseñarme y guiarme por un buen camino, por entenderme y por demostrarme que siempre se puede lograr lo que deseas a base de trabajo y nunca rendirte, porque gracias a ustedes soy lo que soy, sin ustedes nada de esto sería posible, por siempre estar cuando los necesito, por todos los sacrificios que han hecho por darnos a mi hermana y a mí lo mejor, le pido a Dios que me alcance la vida para regresarles un poco de lo mucho que me han dado, por todo muchas gracias los amo con todo mi corazón.

A mi hermana **Naian Ramírez** por siempre llenarme de amor y felicidad con solo verte sonreír, por demostrarme tu apoyo y amor en todo lo que haga, porque desde que llegaste, mi vida se ha llenado de felicidad, te amo hermana.

A mis abuelos **Jesús, Lupe, Daniel y Male**, porque cada día que los veo lo único que hacen es demostrarme su amor y me hacen creer que los abuelos deben ser eternos, dos de ustedes me ven desde el cielo, y no tienen idea de lo mucho que me gustaría que estuvieran conmigo, pero se que sin duda celebran con nosotros este logro, los amo.

A toda mi familia, a mis tíos y primos, gracias por sus consejos su cariño, su apoyo incondicional y por llenar de alegría mi vida.

A **Karen Pérez** por ser más que una compañera, porque sabes lo importante que eres para mí, por todo lo que compartimos, por las noches largas de estudio, porque le diste un giro completo a mi vida desde que te conocí, por siempre ayudarme, acompañarme y exigir tanto de mi cada día, por todo muchas gracias, sin duda hiciste que mis días en la universidad fueran de los mejores de mi vida.

A mi amiga **Fernanda** gracias porque empezamos juntos y terminamos juntos, por las risas, los consejos, el apoyo, los desvelos, la compañía, por ser mi mejor amiga y siempre ayudarme en lo que fuera, te quiero mucho.

Este trabajo se lo dedico a todos ustedes que siempre confiaron en mí, que estuvieron ahí cuando los necesitaba y por ayudarme en todo momento, gracias porque sin ustedes esto no hubiera sido posible.

Con amor, Alexis.

**“La vida te pondrá obstáculos, pero los limites los pones tu”**

# Índice

Resumen .....	1
Introducción.....	3
<b>1. Capítulo I: Antecedentes</b>	
1.1 Congelación.....	6
1.1.1 Formación de cristales.....	8
1.1.2 Curva de congelación.....	9
1.1.3 Daños en la carne por congelación y descongelación.....	10
1.2 Criogeles.....	12
1.2.1 Formación de criogeles.....	13
1.3 Almidón.....	14
1.3.1 Almidón ceroso (waxy).....	16
1.4 Ultrasonido (US).....	16
1.4.1 Principios.....	17
1.4.2 Aplicaciones.....	18
1.4.3 Efecto en la carne.....	19
1.5 Carne.....	20
1.5.1 Estructura del musculo.....	20
1.5.2 Proteínas importantes .....	22
1.6 Color en la carne.....	23
1.6.1 Factores que lo afectan.....	25
1.6.2 Métodos de medición.....	26
1.7 Espectrofotometría.....	28
1.8 Textura.....	30
1.8.1 Análisis de fuerza de corte.....	31
<b>2. Capítulo II: Metodología Experimental</b>	
2.1 Objetivo general.....	35
2.2 Objetivos particulares.....	35
2.3 Diagrama experimental.....	36
2.4 Diseño de caja de iluminación para medición de color por fotografía digital.....	37



2.5	Caracterización materia prima.....	38
2.6	Formación del criogel.....	39
2.7	Comparación en las técnicas de medición de color.....	39
2.8	Incorporación del criogel.....	40
2.9	Determinación de parámetros de perfil de color.....	41
2.9.1	Determinación del espectro del extracto de mioglobina.....	43
2.10	Determinación de fuerza de corte.....	43
<b>3.</b>	<b>Capítulo III: Análisis y discusión de resultados</b>	
3.1	Caracterización de la materia prima.....	47
3.2	Comparación en la medición de color.....	47
3.3	Parámetros de perfil de color.....	52
3.3.1	Extracto de mioglobina.....	58
3.4	Fuerza de corte.....	61
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>63</b>
	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>65</b>

## **Índice de Tablas**

Tabla 1: Combinación de variables para el análisis de las muestras.....	44
Tabla 2: Características de la materia prima.....	47
Tabla 3: Intervalos de confianza para la diferencia en la luminosidad entre las técnicas de medición de color.....	48

## Índice de Figuras

Figura 1: Formación de cristales según la cinética de congelación.....	6
Figura 2: Curva de congelación de agua pura y de un alimento.....	9
Figura 3: Etapas de preparación de criogel.....	13
Figura 4: Cadena de polisacáridos de amilosa y amilopectina.....	15
Figura 5: Estructura elemental del musculo esquelético.....	21
Figura 6: Esquema de los distintos estados de óxido-reducción de la mioglobina de la carne fresca.....	24
Figura 7: Ventana de histograma en programa Photoshop CS6.....	27
Figura 8: Luz blanca dividida en sus componentes por un prisma.....	29
Figura 9: Espectro de absorción de las 3 principales formas de la mioglobina.....	30
Figura 10: Análisis de perfil de textura para la fuerza al corte.....	32
Figura 11: Diagrama experimental.....	36
Figura 12: Caja de iluminación para fotografía en la determinación de color.....	37
Figura 13: Espectro colorímetro Konica Minolta CM-600d.....	40
Figura 14: Ultrasonido de sonda Hielscher UP200S.....	41
Figura 15: Zonas de medición de color.....	41
Figura 16: Esquema de cajas de L* para carne fresca.....	49
Figura 17: Esquema de cajas de L* para carne sonicada .....	50
Figura 18: Fotografías de los diferentes tratamientos de carne.....	51

Figura 19: Esquema de interacción para $L^*$ .....	53
Figura 20: Esquema de interacción para $a^*$ .....	55
Figura 21: Esquema de interacción para $b^*$ .....	56
Figura 22: Esquema de interacción para $\Delta E^*$ .....	57
Figura 23: Curva espectral de absorción para los diferentes niveles de criogel y muestra control.....	59
Figura 24: Curvas de resistencia al corte para carne sonicada descongelada (nivel D) y para carne fresca y descongelada.....	61

## Resumen

En este trabajo se estudió el efecto que tiene la aplicación de criogel en el color y resistencia al corte de carne de cerdo sonicada y congelada. Se formaron los criogeles a partir de hidrogel de almidón waxy al 3% m/v, utilizando la congelación con contacto indirecto de nitrógeno líquido y descongelación por inmersión en agua, se aplicaron 4 niveles de criogel (A-D). Se caracterizaron cortes de lomo de cerdo y fueron sometidos a sonicación para la aplicación de los criogeles, con una amplitud fija y ciclos de sonicación variables, durante 3 y 6 minutos, después se congelaron a -26°C durante 24 horas, se descongelaron a 25°C durante dos horas.

Para la medición de color se utilizó la técnica de fotografía digital, con la ayuda de una caja de iluminación, se determinó la confiabilidad de la prueba comparándola con los resultados de un colorímetro, donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambas pruebas, tomando en cuenta que existe una diferencia mínima, ya que la amplitud de la caja de iluminación afectaba a la imagen de la carne en comparación con el espacio determinado que utiliza el colorímetro digital para la medición.

Se determinó que el nivel D de criogel es el que beneficia al mantenimiento de la calidad la carne, ya que no hay diferencias significativas en el cambio de color con respecto a la muestra control, de igual forma la mioglobina presente en la carne es la metamioglobina y el criogel no causa cambios en el tipo de mioglobina, este cambio se da por la oxidación o reducción de la mioglobina, causado por el contacto de la carne con el aire, o por la oxidación provocada por la congelación, finalmente se demostró que la utilización de criogel ayuda a mantener la ternura de la carne ya que la carne descongelada sin criogel mostró una disminución en la fuerza de corte de la carne provocado por el daño en la congelación por la formación de cristales, sin embargo, tuvo un desplazamiento en el tiempo para comenzar el corte provocado por el desplazamiento de los componentes a la superficie de la carne por la disminución de la humedad por la congelación-descongelación, y la carne con el nivel D de criogel no muestra diferencias significativas en el desplazamiento del tiempo con respecto a la carne fresca, pero hubo un aumento en la fuerza de corte,

debido a la formación de enlaces del criogel con el agua libre de la carne, lo que causó mayor resistencia en las fibras de la carne, necesitando más fuerza para su corte.

## Introducción

Debido a que la carne es un producto altamente perecedero, requiere de métodos de conservación, para su almacenamiento, con la necesidad de mantener los atributos de calidad. Uno de los más utilizados es la congelación, que permite prolongar la vida útil de los productos sin modificar notablemente sus características sensoriales. Sin embargo, durante el proceso y en la descongelación la carne sufre varias modificaciones en su estructura que afectan a su color y textura (Genot, 2003).

Los efectos que tiene la congelación en la estructura de la carne son:

- Separación celular, el agua que está fuera de las fibras se congela antes que la que se encuentra dentro de las fibras, generándose una fuerza osmótica que hace que salga líquido del interior al exterior.
- Daño en membranas y proteínas, por los cristales de hielo formados.
- Desnaturalización proteica por cambios en la matriz acuosa no congelada: en la presión osmótica, el pH y la fuerza iónica.

La velocidad de congelación y la formación de pequeños cristales de hielo en la congelación son críticos para minimizar el daño celular y la pérdida por goteo en la descongelación de la carne (Li & Sun, 2002).

Por lo que, se requiere utilizar tratamientos alternativos, que reduzcan el daño en la calidad sensorial de la carne.

Un tratamiento alternativo es la incorporación de un criogel, hecho a base de un hidrogel formado por congelación-descongelación de este; los criogeles son compuestos que mejoran la calidad y prolongan la vida útil de los alimentos congelados. Estas sustancias pueden ser añadidas durante el procesamiento y la formulación del producto (Martin, 1997).

Una forma de añadir el criogel puede ser con ultrasonido, ya que, su uso tiene un efecto en la transferencia de masa, por lo que es una herramienta que beneficia dicho proceso (Haydock & Yeomans, 2003).

Los parámetros acústicos (frecuencia, intensidad, duración del tratamiento, temperatura) determinan la extensión del resultado deseado obtenido de la sonicación, y a su vez es capaz de provocar cambios en las proteínas y estructura de la carne, esto por la oscilación periódica de la presión acústica. La ruptura de los tejidos resulta en la desnaturalización de proteínas, minerales y otros componentes y consecuente aceleración de la actividad enzimática, así como la degradación de las macromoléculas de colágeno, por lo que genera un ablandamiento en los tejidos de la carne (Jayasooriya, 2004). El color es el factor que más afecta la apariencia de la carne y de los productos cárnicos durante su almacenamiento y el que más influye en la preferencia de los consumidores, por lo que su mantenimiento y apariencia es esencial, gira en torno a la mioglobina, el pigmento primario en la carne, sin embargo, este se ve afectado por muchos factores como la especie, genética y los antecedentes nutrimentales, los cambios post mortem en los músculos (especialmente la dinámica del pH y la disminución de la temperatura), los efectos inter e intramusculares, las temperaturas de almacenamiento post mortem y el tiempo (AMSA, 2012).

Así mismo, la dureza o terneza de la carne es uno de los atributos más importantes de su calidad, este atributo no es tan variable entre los diferentes tipos de carne. Los principales componentes de la carne que contribuyen a su terneza o dureza son el tejido conectivo, las fibras musculares y los lípidos asociados al tejido muscular, aunque estos últimos son los de menor importancia en este aspecto (Smith *et al.*, 1978).

Por lo tanto, el objetivo de este proyecto fue evaluar el efecto que tiene la aplicación de criogel a diferentes niveles (A-D) como pretratamiento a la congelación de carne de cerdo, aplicado por ultrasonido evaluando el efecto que tiene en la conservación del color y contenido de mioglobina, así como al esfuerzo al corte o terneza de la carne.



# CAPÍTULO I

# Capítulo I Antecedentes

## 1.1 Congelación

Es el proceso de conservación originado por la reducción de la temperatura por debajo de aquella en la que se comienza a formar cristales en un material alimenticio (Orrego, 2008). A temperaturas inferiores a 0° C hay una reducción significativa en las tasas de crecimiento de los microorganismos y en el correspondiente deterioro del producto debido a la actividad microbiana, ya que la formación de cristales de hielo dentro del producto cambia la disponibilidad de agua para participar en las reacciones. A medida que la temperatura se reduce el agua se transforma en estado sólido, por lo que hay menos agua disponible para soportar las reacciones de deterioro (Singh & Heldman, 2009).

Aunque este proceso como conservación generalmente resulta en un producto de alta calidad para el consumo, esta está influenciada por el proceso y las condiciones de almacenamiento congelado.

Para algunos productos, se requiere de un enfriamiento rápido (tiempos cortos) para asegurar la formación de pequeños cristales de hielo dentro de la estructura del producto y un daño mínimo a la textura (Singh & Heldman, 2009). La Figura 1 muestra la formación de cristales en la congelación lenta (Figura 1A) y rápida (Figura 1B).

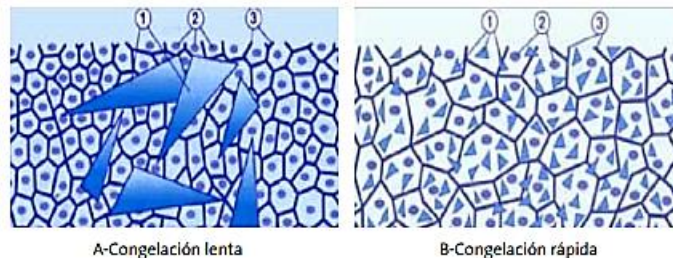


Figura 1: Formación de cristales según la cinética de congelación. 1-cristales de hielo, 2- núcleos de células, 3-paredes de células.  
Fuente: Agoulon, 2012.

El alimento congelado es susceptible a reacciones físicas y bioquímicas, lo cual puede afectar sus cualidades sensoriales, debido a que no están en estado sólido por completo. La cinética del descenso de temperatura durante el proceso influye en las características (número y tamaño) y en el crecimiento de cristales. En muchos casos, el deterioro causado por el hielo se explica por la rigidez y el tamaño de los cristales del interior de la estructura celular de los alimentos. El resultado de esto es una presión mecánica que puede dañar la estructura celular de productos como la carne, la fruta y las verduras (Agoulon, 2012).

El producto alimenticio debe exponerse a un medio de baja temperatura durante un tiempo suficiente para eliminar el calor sensible y el calor latente de fusión, su eliminación produce una reducción en la temperatura, así como una transformación del agua de líquido a estado sólido (Singh & Heldman, 2009).

El proceso se divide en tres etapas:

- Precongelación, que es el período desde el comienzo del enfriamiento hasta que comienza a cristalizarse el agua.
- Congelación, que es el período durante el cual la temperatura del material es más o menos constante (cambio de fase) si la sustancia es pura, antes de iniciar la congelación puede existir un ligero subenfriamiento seguido de un incremento de temperatura hasta el punto de fusión o congelación del material.
- Luego que los materiales se congelan por completo sigue un descenso de temperatura aproximadamente lineal, causado por el retiro de calor sensible del producto sólido, fase que concluye cuando el material alcanza la temperatura del medio refrigerante o congelador utilizado para el proceso (Orrego, 2008).

### 1.1.1 Formación de cristales

Un factor determinante en la calidad sensorial del producto congelado es el tamaño de los cristales de hielo formados. Éste depende de la tasa de nucleación y de la velocidad de extracción de calor del sistema (Kiani & Sun, 2011; Petzold & Aguilera, 2009), si ésta es baja, se forman pocos núcleos de hielo y éstos; por tanto, dan lugar, durante la etapa de cambio de fase, a pocos cristales de hielo, pero de gran tamaño. Estos cristales grandes producen daños en la estructura de los alimentos, provocando desde alteraciones en su textura hasta una importante pérdida de agua durante la descongelación. Por el contrario, si la tasa es elevada, se forma una gran cantidad de núcleos de hielo, éstos dan lugar a muchos cristales de hielo que, si la velocidad de extracción de calor del sistema es adecuada, serán de pequeño tamaño y causarán pocas pérdidas de calidad en los alimentos.

Durante la fusión del agua en un alimento, inicialmente sólo aparecen cristales de hielo puro; esto ocurre a la temperatura de inicio de la congelación, a medida que prosigue proceso llega un momento en el que ya comienzan a formarse cristales de soluto + agua. Cuando se congelan materiales biológicos sólo cristaliza entre el 90 y 95% del agua líquida presente en el alimento (Orrego, 2008).

La formación de hielo durante la cristalización se puede describir en 2 pasos:

- Nucleación

Es el proceso que antecede a la cristalización; en él aparecen los núcleos de hielo como consecuencia del subenfriamiento, es el reacomodo de las moléculas de agua en una partícula ordenada con un tamaño suficiente para sobrevivir y promover el crecimiento de cristal, es decir, aparecen núcleos de hielo o agentes iniciadores para que la fase cristalina se desarrolle; para que esto ocurra es necesario el subenfriamiento del sistema, ya que se requiere superar una barrera de energía que acompaña a la formación de la nueva fase. durante este proceso se libera calor latente de solidificación, la velocidad a la cual se lleva a cabo la nucleación depende

de la temperatura del medio de congelación y la viscosidad del medio y el volumen de la muestra (Nicoletti, 2012).

- Crecimiento de cristales

El crecimiento cristalino requiere que las moléculas puedan difundirse hasta la superficie de los núcleos cristalinos crecientes. La presencia de pocas cantidades de impurezas disminuye el índice de la propagación. Mientras que la cantidad de cristales de hielo aumenta y la temperatura disminuye, la concentración del soluto de la fase no congelada aumenta llegando a cierta concentración máxima de solutos en la que la cristalización se detiene. Otros componentes en soluciones acuosas alimenticias afectan la cristalización del hielo (Orrego, 2008).

### 1.1.2 Curva de Congelación

Una forma de determinar la velocidad es mediante cinética de congelación, que es una curva donde se presenta la velocidad de formación de los cristales en los alimentos durante la congelación (Singh & Heldman, 2009). La curva de temperatura-tiempo para agua y el alimento se muestran en la Figura 2.

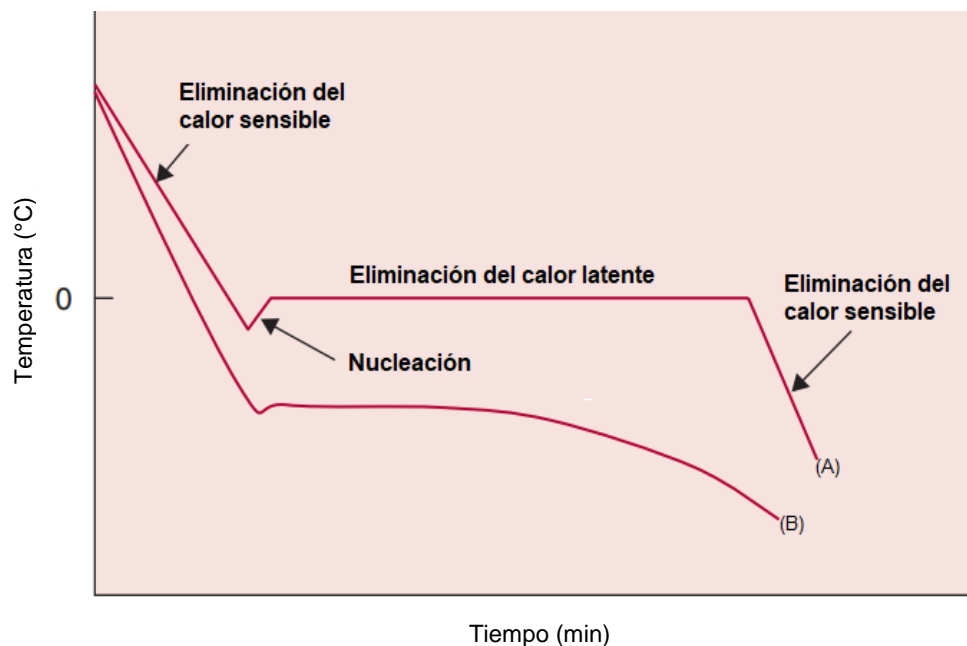


Figura 2: Curva de congelación de agua pura (A) y de un alimento (B).  
Fuente: Singh & Heldman, 2009.

Durante el período de preenfriamiento, la temperatura del agua (A) disminuye hasta el punto de congelación a medida que se elimina el calor sensible. La curva muestra una pequeña cantidad de sobre enfriamiento (por debajo de 0 ° C); una vez que se produce la nucleación y comienzan a formarse cristales de hielo, el punto de congelación aumenta a 0 ° C. Esta permanece en el punto de congelación hasta que se produce un cambio completo de fase a medida que el calor latente de fusión se elimina del agua líquida para convertirla en hielo sólido. Cuando toda el agua líquida se ha transformado en hielo sólido, la temperatura del hielo disminuye rápidamente a medida que se elimina el calor sensible durante el período de post-congelación.

Para el alimento (B), la gráfica es similar a la del agua, pero con diferencias importantes. Al igual que el agua, la temperatura disminuye durante la refrigeración interna a medida que se elimina el calor sensible.

Sin embargo, la temperatura a la cual ocurre la nucleación inicial y los cristales de hielo comienzan a formarse es menor que la del agua debido a la presencia de solutos en el alimento, después de un breve período de sobre enfriamiento, el calor latente se elimina gradualmente; ésta desviación es el resultado del efecto de concentración de los solutos durante la congelación de los alimentos, a medida que el agua en él alimento se convierte en hielo, el agua restante se vuelve más concentrada con solutos y deprime el punto de congelación. Este cambio gradual de temperatura con la eliminación adicional de calor latente continúa hasta que el alimento es en gran parte una mezcla de los componentes sólidos iniciales de alimentos y hielo, después de este tiempo, la mayor parte del calor sensible se elimina hasta que se alcanza la temperatura de congelación (Singh & Heldman, 2009).

### **1.1.3 Daños en la carne por congelación y descongelación**

La práctica de congelar la carne para prolongar su vida útil ha sido utilizada durante miles de años, sin embargo, las consecuencias de la congelación y descongelación en su calidad siguen siendo un problema importante.

La congelación y descongelación influyen principalmente en la fracción de agua, dado que esta está contenida dentro y entre las fibras musculares, se crean compartimentos en el tejido, lo que complica el proceso. A medida que se congela, la concentración de los solutos restantes (proteínas, carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales) aumenta (Lawrie, 2006).

Los cambios en el entorno inmediato de las fibras musculares afectan las características de la membrana celular, que a su vez afectan la calidad de la carne (Fellows, 2000).

La congelación, el almacenamiento congelado y la descongelación contribuyen a disminuir la capacidad de retención de agua (CRA) de la carne, que está relacionada con la alteración de la estructura de la fibra muscular, así como la modificación y/o desnaturalización de las proteínas.

La cantidad de exudado que se forma después de la congelación depende al tamaño y la distribución de los cristales de hielo que se forman a lo largo de la congelación (Leygonie, Britz & Hoffman, 2012).

Una disminución en el tiempo de descongelación da como resultado una disminución en el exudado, esto debido a la fusión del hielo en los espacios extracelulares, lo que provoca un aumento de la actividad del agua ( $A_w$ ), por lo que el flujo neto de agua va hacia los espacios intracelulares y a su posterior reabsorción por las fibras deshidratadas. A mayor tiempo de descongelación, el agua disponible supera la velocidad a la que las fibras pueden reabsorber, con el exceso esta se excreta como exudado (González, Añon & Cavelo, 1985).

La mioglobina se ha identificado en el exudado mediante electroforesis en gel, lo que se debe en parte al cambio en la estabilidad del color en la congelación y la descongelación. También la desnaturalización del resto de globina de la molécula de mioglobina tiene lugar en algún momento durante la congelación, el almacenamiento congelado y el descongelamiento, la desnaturalización conduce a

una mayor susceptibilidad de la mioglobina a la autooxidación y la posterior pérdida de la presentación óptima del color (Leygonie, Britz & Hoffman, 2012).

## **1.2 Criogeles**

Para evitar el daño provocado por la congelación, se han utilizado tratamientos alternativos como los criogeles, estos se denominan geles poliméricos formados a temperaturas por debajo del punto de congelación normal de una solución o dispersión coloidal (Lozinsky, 2002), son utilizados como crioprotectores para mejorar la calidad y prolongar la vida útil de alimentos congelados. El término crioprotector incluye todos los compuestos que ayudan a prevenir cambios perjudiciales causados por procesos de congelación y descongelación o almacenamiento congelado. Estas sustancias pueden agregarse durante el procesamiento y la formulación del producto o producirse de forma natural en el organismo vivo, pueden ser utilizados en frutas, vegetales y carnes, el alargamiento de la vida útil puede estar relacionada con la estabilización de la estructura celular y en el control del movimiento del agua para prevenir el colapso celular, así como estabilizar las proteínas y controlar la forma y el tamaño de cristal durante la congelación (MacDonald & Lanier, 1997).

Una característica típica de diversos criogeles poliméricos es la morfología heterofásica, heteroporosa, supermacroporosa, esponjosa o celular. Los macroporos en el criogel suelen estar interconectados porque durante la congelación, cada cristal del disolvente crece, por regla general, desde la periferia hacia el centro hasta que entra en contacto con la cara de otro cristal. En los últimos años, el interés en los criogeles poliméricos no solo como objetos de investigación científica, sino también como materiales prometedores para la solución de problemas aplicados ha aumentado constantemente, el intervalo de aplicaciones de las técnicas de gelificación criogénica y los materiales de gel es bastante amplio (Lozinsky, 2002).



Como los criogeles poseen una alta porosidad y una alta resistencia mecánica, pueden emplearse para una variedad de aplicaciones tales como filtración/separación, absorción y purificación (Sahiner *et al.*, 2016).

### 1.2.1 Formación de criogeles

Gun'ko, Savina & Mikhalovsky, (2013) definen los siguientes pasos para la formación de un criogel:

1. Congelación de la dispersión inicial.
2. Mantener congelada durante cierto tiempo para permitir la formación de poros, influenciadas por los microcristales del disolvente.
3. Descongelación de la solución para obtener el criogel.

Como se muestra en la Figura 3, el sistema inicial contiene las macromoléculas en la solución, las cuales son capaces de formar un gel, dicho sistema se somete a congelación y en ese estado se forman cristales de solvente congelado y una microfase de líquido sin congelar. La crioconcentración produce que la concentración del polímero aumente en la zona sin congelar y se da la formación de los enlaces del criogel, estos surgen de la interacción entre las cadenas vecinas de polímero debido a los enlaces de hidrógeno de los grupos hidroxilo. Los cristales actúan como formadores de los poros; una vez que se descongela el sistema los espacios que ocupaban los cristales se rellenan con solvente y la tensión superficial entre el solvente y la fase de gel redondea a los poros (Lozinsky *et al.*, 2003).

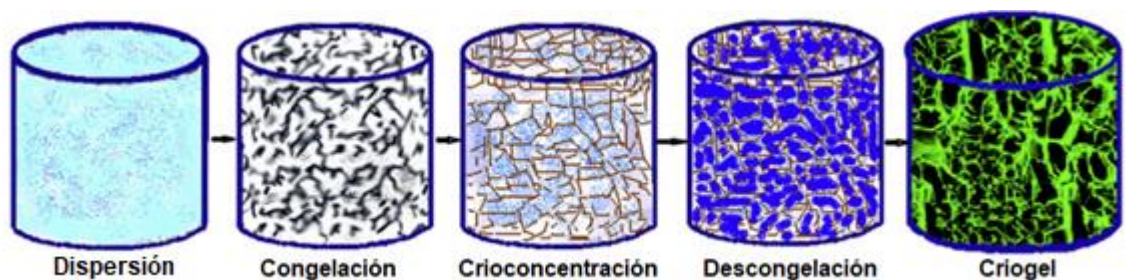


Figura 3: Etapas de preparación de criogel.  
Fuente: Gun'ko, Savina & Mikhalovsky, (2012).

### 1.3 Almidón

El almidón presenta numerosas propiedades funcionales que dan lugar a diversas aplicaciones en alimentos u otras ramas industriales, es utilizado como agente espesante, de cobertura, gelificante, adhesivo y como agente encapsulante, algunas de estas funcionalidades son únicas del polímero debido a la estructura de amilosa y amilopectina y su organización. La gelatinización, retrogradación y formación de pasta son los tres fenómenos más importantes que definen la funcionalidad del almidón en sus diferentes aplicaciones (Liu, 2005). Por lo que constituye una excelente materia prima para modificar la textura y consistencia de los alimentos (French, 1984; Biliaderis, 1991). Su funcionalidad depende del peso molecular promedio de la amilosa y la amilopectina, así como de la organización molecular de estos glucanos dentro del gránulo. Los almidones nativos se utilizan porque regulan y estabilizan la textura y por sus propiedades espesantes y gelificantes (Cousidine, 1982).

El tamaño del gránulo afecta la composición, propiedades reológicas y transiciones de fase producidas al calentar una dispersión de almidón (Kulp, 1973).

La pérdida del orden de los componentes del almidón, amilosa y amilopectina puede estar relacionada con cambios irreversibles en sus propiedades, como hinchamiento, formación de pasta y disolución (Biliaderis, 1991).

El almidón y los productos obtenidos por su modificación exhiben una amplia gama de propiedades características:

- Origen natural
- Biocompatibilidad
- Biodegradabilidad
- Hinchazón
- Formación de gel

- Formación de películas
- Digestible por enzimas humanas y bacterias del colón
- Derivados fáciles de formar que proporcionan propiedades adicionales, como solubilidad modificada, dependencia del pH, dispersión rápida y bioadhesión.

El almidón nativo se compone de dos polisacáridos distintos: amilosa y amilopectina.

La amilosa (Figura 4A) consiste en cadenas no enmascaradas de 200-2000 unidades de glucopiranososa (GU) unidas a través de enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4). La amilopectina (Figura 4B) es un polímero ramificado con secuencias de 20-30 GU unidas mediante enlaces  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4) glucosídicos y puntos de ramificación con enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 6), para un total de aproximadamente  $3 \times 10^6$  GU (Wurzburg, 1986; Buléon *et al.*, 1998).

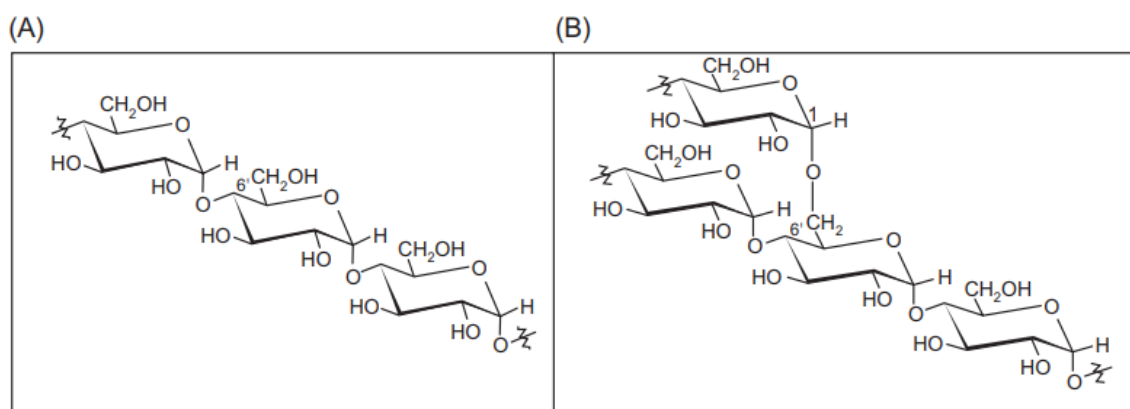


Figura 4: Cadena de polisacáridos de amilosa (A) y amilopectina (B).  
Fuente: Wurzburg, (1986); Buléon *et al.*, (1998).

Existen cuatro clases de almidón de maíz: el almidón de maíz normal que contiene 25% de amilosa; el de maíz ceroso que contiene casi 100% de amilopectina y dos clases correspondientes a maíces amiláceos, de alto contenido de amilosa, uno tiene 55% y el otro entre 70 y 75% (García, 2011).

### **1.3.1 Almidón ceroso (waxy)**

El almidón de maíz alto en amilopectina (ceroso), es un tipo especial de maíz derivado de una mutación (wx=Waxy) introducida en 1908 desde China a EUA, su nombre deriva por la apariencia cerosa del endospermo en un corte longitudinal del grano (García, 2011).

El maíz ceroso o waxy posee un almidón ramificado completamente, constituido en un 100% por amilopectina, la facilidad para formar gel, la retrogradación, junto con la adhesividad, la habilidad para formar películas y la digestibilidad, combinado con su bajo costo, hacen al almidón de maíz un material útil para la manufactura de productos alimenticios tales como salsas, sopas, postres lácteos (Inglett, 1970). Contrariamente a los almidones de maíz clásico, de trigo y las féculas, el almidón waxy no pierde sus propiedades originales después de la congelación y descongelación.

### **1.4 Ultrasonido (US)**

La tecnología de US ha sido empleada en diferentes investigaciones de la industria de alimentos y existe un gran interés en ello, debido a que se puede aplicar de forma práctica, con equipo seguro y sobre todo puede considerarse ambientalmente sustentable. Haydock & Yeomans (2003), destacan que el uso de US tiene un efecto en la transferencia de masa, por lo que es una herramienta que beneficia dichos procesos.

Este se define como una onda que transporta energía mecánica a través de la vibración local de partículas a frecuencias de 20 kHz o más, sin una red que transporte las partículas entre sí (Leighton, 2007), otra definición la realizó Mason (1998), en la cual lo establece como cualquier sonido con frecuencia más allá de lo que el oído humano puede percibir (16 kHz).

### 1.4.1 Principios

El US representa una onda de presión de alta frecuencia, a medida que esta onda pasa a través del medio, se crean regiones de alta y baja. El tamaño de estas variaciones, denominadas amplitud de la onda, es directamente proporcional a la cantidad de energía aplicada al sistema. A medida que esta ola pasa a través de un medio, ya sea aire o agua, disipará esta energía en forma de flujo viscoso. Esto se conoce como "transmisión constante".

Su aplicación se puede dar de tres maneras (Chemat, Huma & Khan, 2011).

- Aplicación directa al producto
- Acoplada a un dispositivo
- Sumergido en un baño ultrasónico

Las aplicaciones de las ondas ultrasónicas se dividen por lo general en dos grupos: baja y elevada intensidad. Las aplicaciones de baja intensidad son aquellas cuyo objetivo es obtener información acerca del medio de propagación sin producir ninguna modificación en su estado. Por el contrario, las aplicaciones de elevada intensidad son aquellas en la que la energía ultrasónica se utiliza para producir cambios permanentes en el medio tratado (Chemat, Huma & Khan, 2011).

La aplicación de ultrasonidos de baja intensidad y alta frecuencia, son los más utilizados en la industria alimentaria, debido a que no es destructivo en los procesos alimenticios, este se utiliza para el monitoreo durante el proceso, desde la composición del producto, textura, estructura, nivel de fluido, espesor y caudal (Jayasooriya, 2004).

El otro grupo es el de potencia, que utiliza altos niveles de intensidad o potencia (cientos de volts a diez kilovolts) y bajas frecuencias (20 kHz y 100 kHz). Los efectos físicos, mecánicos o químicos de las ondas ultrasónicas en este intervalo son capaces de alterar las propiedades del material (por ejemplo, la alteración de la

integridad física, la aceleración de ciertas reacciones químicas) mediante la generación de una inmensa presión, cizallamiento y gradiente de temperatura en el medio a través del cual se propagan. Este fenómeno se utiliza para la limpieza, soldadura y en muchas reacciones químicas (Jayasooriya, 2004).

### **1.4.2 Aplicaciones**

Según Robles & Ochoa (2012), el US puede ser muy útil para un procesamiento mínimo, debido a que la transferencia de energía acústica al producto alimenticio es instantánea y en todo el volumen del producto. Esto significa una reducción del tiempo total de procesamiento, mayor rendimiento y menor consumo de energía. En muchos casos, la combinación de las técnicas convencionales con ultrasonido da los mejores resultados (Chemat, Huma & Khan, 2011).

Una característica de las ondas ultrasónicas de elevada intensidad es su capacidad para trabajar de manera que actúan en sinergia con otras formas de energía estimulando, acelerando, o mejorando muchos procesos.

Se considera como efectos ventajosos de esta tecnología lo siguiente:

- Efectiva contra células vegetativas, esporas y enzimas
- Reducción de los tiempos y temperaturas de proceso
- Pocos requerimientos de adaptación en plantas ya establecidas
- Incrementos en la temperatura por el colapso de las microburbujas y de la transferencia de masa por el movimiento de las ondas ultrasónicas.
- Posible modificación de la estructura y textura en alimentos
- Puede emplearse en procesos continuos o intermitentes
- Efecto sobre la actividad enzimática (Robles & Ochoa, 2012).

Para que la tecnología de ultrasonido pueda aplicarse en procesos alimenticios, se considera que el criterio de mayor importancia es la cantidad de energía del campo generador de sonido. Está caracterizado por el poder y la intensidad del sonido o por la densidad de energía del sonido (Villamiel & de Jong, 2000).

El efecto del ultrasonido sobre los agentes alterantes de los alimentos es limitado y dependiente de múltiples factores, por ello, su aplicación se ha encaminado hacia la combinación simultánea o técnicas de conservación.

### **1.4.3 Efecto en la carne**

El US a altas intensidades es capaz de alterar los componentes de la carne, y la oscilación periódica de la presión acústica provoca el ablandamiento de las membranas celulares. La ruptura de los tejidos resulta en la migración de proteínas, minerales y otros componentes y consecuente aceleración de la actividad enzimática, así como la degradación de las macromoléculas de colágeno. Los efectos compuestos de esas influencias ultrasónicas podrían mejorar la ternura y las propiedades sensoriales de la carne (Jayasooriya, 2004).

Los parámetros acústicos (frecuencia, intensidad, duración del tratamiento, temperatura) determinan la extensión del resultado deseado obtenido de la ultrasonicación. Entre las aplicaciones del uso de ultrasonido en la carne se encuentra que provoca cambios en las propiedades físicas y químicas lo cual proporciona una alternativa a los medios químicos o térmicos de procesamiento, así como de conservación.

De igual forma provoca un aumento en la permeabilidad de las fibras del músculo debido al efecto que tiene en las miofibrillas por la cavitación (Floros & Liang, 1994).

También es capaz de cambiar las propiedades de las proteínas, como la estructura y la actividad enzimática, además, los niveles significativamente más altos de radicales libres en los tejidos musculares y los cambios en la liberación de aminoácidos de las proteínas musculares. Ha habido un aumento significativo en

las cantidades de ciertos aminoácidos en muestras de carne tratadas con ultrasonido (Jayasooriya, 2004).

## **1.5 Carne**

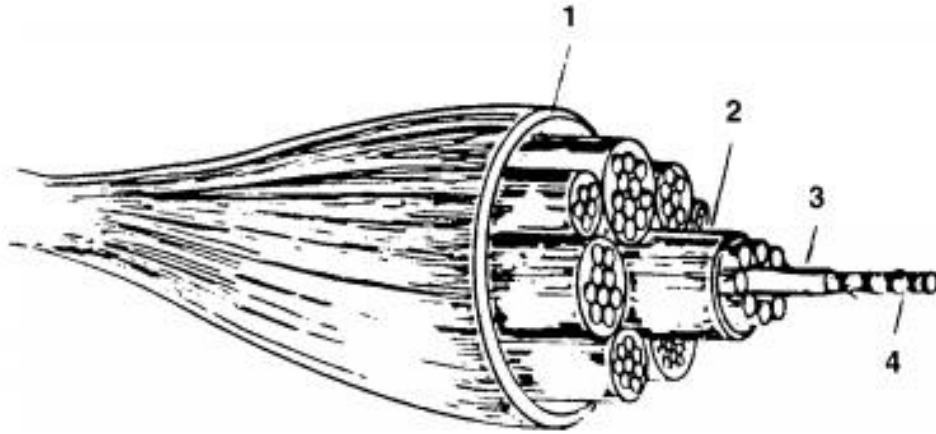
Según la NOM-194-SSA1-2004, se entiende por carne a la estructura muscular esquelética estriada, acompañada o no de tejido conectivo, hueso y grasa, además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos; provenientes de los animales para abasto, que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas.

### **1.5.1 Estructura del músculo**

Más de 600 músculos esqueléticos distintos, de diferentes tipos y tamaños constituyen entre el 35 y 60% del peso de la canal de los mamíferos por lo que este tipo de músculo es el principal componente de la carne, la mayoría de los músculos esqueléticos se unen directamente a los huesos, pero algunos lo hacen a ligamentos o fascias, cartílagos y piel, todos se caracterizan por estar rodeados de una serie de componentes del tejido conectivo que las protegen, sostienen y les dan la firmeza necesaria (Andújar, Pérez & Venegas, 2003).

El músculo esquelético (Figura 5) consiste en células largas, delgadas y paralelas dispuestas en haces de fibras. Cada una de estas fibras musculares existe como una entidad separada rodeada por tejido conectivo, el endomisio. El número de estas fibras musculares primarias se mantiene unido en un haz que está rodeado por una hoja más grande de tejido conectivo delgado, el perimisio. Muchos de estos haces primarios se mantienen unidos y envueltos por una capa externa, grande y gruesa de tejido conectivo llamada epimisio (Belitz, Grosch & Schieberle, 2009).





*Figura 5: Estructura elemental del músculo esquelético, 1. epimisio, 2. perimisio, 3. endomisio, 4. fibra muscular.*

*Fuente: Belitz, Grosch & Schieberle (2009).*

La unidad esencial del tejido muscular es la fibra que consta de miofibrillas que son elementos proteicos formados, entre las cuales se encuentra una solución, el sarcoplasma y el retículo sarcoplásmico, que es una fina red de túbulos, la fibra delimitada por una membrana muy delgada es el sarcolema a la que se une el tejido conectivo en el exterior (Lawrie, 2006).

El tejido conectivo representa más del 30% de la proteína del músculo. Este envuelve las fibras musculares y los haces de fibras, así como al propio músculo, se caracteriza por tener relativamente pocas células y una considerable cantidad de sustancia extracelular, esta sustancia tiene fibras embebidas en ella, que son los elementos estructurales del tejido conectivo, es una solución viscosa que contiene glucoproteínas solubles, carbohidratos, lípidos y agua. Las propiedades del tejido conectivo y del tejido adiposo contribuyen, en calidad y cantidad, a las propiedades del músculo (Andújar, Pérez & Venegas, 2003).

En un sentido amplio, la composición de la carne puede aproximarse al 75% del agua, el 19% de proteínas, el 3,5% de sustancias solubles no proteicas y el 2,5% de grasas (Lawrie, 2006).

## 1.5.2 Proteínas importantes

La proteína es el componente más importante de la carne y en contenido ocupa el segundo lugar después del agua (Andújar, Pérez & Venegas, 2003).

Según Belitz, Grosch & Schieberle (2009), las proteínas musculares se pueden dividir en tres grandes grupos:

- a) Proteínas insolubles (tejido conectivo y proteínas de membrana).

El tejido conectivo contiene varios tipos de células, estas células sintetizan muchas sustancias amorfas intercelulares (carbohidratos, lípidos, proteínas) en las que están incrustadas las fibras de colágeno, el cual constituye el 20-25% de la proteína total en mamíferos, se caracteriza por su alto contenido en glicina y prolina.

- b) Proteínas miofibrilares, extraíbles con soluciones concentradas de sal (Actomiosina, tropomiosina y troponina).

Se conocen unas 20 proteínas miofibrilares diferentes, donde predominan la miosina y la actina, que representan el 65-70% de la proteína total. Las proteínas restantes son las tropomiosinas y troponinas, que son importantes para la contracción, y varias proteínas del citoesqueleto, que están involucradas en la estabilización del sarcómero.

Estas proteínas imparten al músculo rigidez estructural y son decisivas en la transformación de energía química en mecánica durante la contracción.

Las moléculas de miosina forman los filamentos gruesos y constituyen aproximadamente el 50% de las proteínas totales presentes en el aparato contráctil. Durante la contracción muscular cada cabeza de miosina se une a una molécula de actina-G del filamento de actina. La formación de puentes mediante esta interacción entre la actina y la miosina forman el complejo Actomiosina. La actina es el constituyente principal del filamento delgado, es menos soluble que la miosina y constituye el 22% de la proteína total del aparato contráctil. La tropomiosina

representa del 10 al 12 % de las proteínas contráctiles, ejerce junto con la troponina una función reguladora e imparte estabilidad mecánica a los filamentos, debido a su alto contenido de  $\alpha$ -hélice (Andújar, Pérez & Venegas, 2003).

c) Proteínas Sarcoplásmicas (mioglobina y enzimas).

Las proteínas solubles constituyen el 25-30% de la proteína total en el tejido muscular, constan de 50 componentes, principalmente enzimas y mioglobina.

La mioglobina y la hemoglobina son los compuestos que le proporcionan el color rojo a la carne. La mioglobina se encuentra en las células musculares y la hemoglobina es el pigmento de la sangre. La mioglobina es una proteína sarcoplásmica que se compone de 153 aminoácidos y tiene un peso molecular aproximado de 18 kDa. Se compone de un grupo prostético; la globina, y un centro que tiene un grupo Hemo, responsable del color ya que al poder ligarse con otras moléculas le confiere propiedades de oxidación y reducción (Mohan, 2009) y le permite desempeñar papeles distintos de almacenamiento de oxígeno asumiendo diferentes subestados de conformación.

La formación de mioglobina se incrementa con la edad y cuando el esfuerzo del músculo es mayor. Los músculos más rojos son aquellos responsables del desarrollo de procesos dinámicos y por ello disponen de un metabolismo oxidante intenso, con el necesariamente alto contenido de mioglobina; mientras que en los músculos blancos se encuentra menos mioglobina debido a que están sometidos a un esfuerzo menor (Lawrie, 2006). Por ejemplo: El músculo extensor *Carpí radialis*, cuya función es de movimiento tiene un contenido de mioglobina de 12 mg/g, mientras que el músculo *Longissimus dorsi* tiene un contenido de 6 mg/g (Oyagüe, 2007).

## 1.6 Color en la carne

El color se considera el atributo sensorial más importante de la carne fresca. Esto se debe en gran parte a que es el primer indicador de calidad utilizado por los

consumidores para evaluar la calidad y la frescura de la carne (Fautsman & Cassens, 1990).

Se puede definir al color como una percepción humana de la luz reflejada por un objeto. Se trata de una apreciación, que depende de cómo nuestros ojos detectan la luz reflejada y de cómo nuestro cerebro la procesa (Heredia, 2009).

El color de la carne depende fundamentalmente de la estructura del músculo, de la concentración y el estado de reducción de la mioglobina (figura 6), que se considera el principal pigmento responsable del color de la carne fresca (Purslow, 2017).

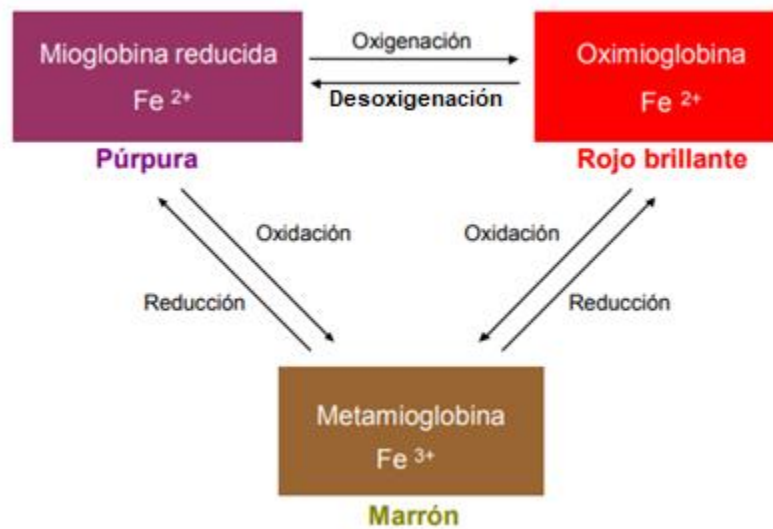


Figura 6: Esquema de los distintos estados de óxido-reducción de la mioglobina de la carne fresca. Fuente: Prieto (2006).

El ciclo del color en las carnes frescas es reversible y dinámico permitiendo una constante interconversión de las tres formas de pigmentos: mioglobina, oximioglobina y metamioglobina. El color de la carne está determinado esencialmente por dos niveles de oxidación del átomo de hierro del grupo hemo. En forma ferrosa reducida ( $Fe^{2+}$ ) o férrica oxidada ( $Fe^{3+}$ ). Cuando la disponibilidad de oxígeno es alta, la desoximioglobina se transforma a oximioglobina dando un rojo brillante en la carne. Por el contrario, si la tensión de oxígeno es baja, ocurre una

reacción de oxidación y se forma metamioglobina dando a la carne un color marrón (Girolami *et al.*, 2012).

No obstante, la carne también está compuesta por grasa, con lo cual, tanto la cantidad de depósito graso como la proporción de los distintos ácidos grasos y la concentración de pigmentos en la misma influirán en el color final de la carne (Albertí, 2001). La concentración de mioglobina también puede depender de la raza, edad, sexo y condiciones ambientales (Prieto, 2006).

### **1.6.1 Factores que lo afectan**

La cantidad de mioglobina presente en la carne, que se refleja como la saturación de color rojo y el estado químico de la mioglobina, afectado por el potencial óxido reducción, que se ve reflejado como el tono del color, son los principales factores de los cuales depende el color.

De igual forma la luz y el tamaño de la muestra son de gran importancia para la percepción del color de la carne, sin luz, no hay color ni visión, las diferencias de tamaño en los cortes pueden afectar cómo se percibe el color debido a la cantidad de luz reflejada. Para cortes más grandes, más luz se refleja en el ojo, y el color se percibe a menudo como siendo más brillante y más vivos. Las diferencias de fondo también afectarán la percepción del color. Los cortes vistos contra un fondo brillante parecen a menudo tener un color más oscuro, mientras que los cortes vistos contra un fondo oscuro parecen a menudo más brillantes. Se debe tener cuidado de estandarizar el fondo de modo que puedan realizarse determinaciones de color comparativas (AMSA, 2012).

Los factores pueden ser observados mediante colorimetría utilizando el sistema CIEL\* a\* b\*. El valor (L\*) determina el grado de luminosidad de un color, va de 0 a 100, de color negro a blanco respectivamente, y está relacionada con el estado, tamaño y posición de las fibras musculares ya que de ello depende el grado de reflexión y absorción del espectro luminoso, además de la presencia de agua, en sus tres posibles estados libre, contenida y ligada (Oyagüe, 2007). El valor a\* que

va de color rojo (+) a verde (-), representa la cantidad de mioglobina en la carne y para estimar el estado químico de la mioglobina se utiliza el valor  $b^*$  que constituye al color amarillo (+) y azul (-).

### **1.6.2 Métodos de medición**

Existen dos equipos principales capaces de medir el color, el colorímetro y el espectrofotómetro. Ambos usan sus propias fuentes de luz y ciertas condiciones de iluminación (por ejemplo, iluminantes A, C o  $D_{65}$ ). Los instrumentos difieren en la forma en que miden la luz reflejada. El método del colorímetro usa una fuente de luz que ilumina la muestra y luego se refleja a través de filtros rojos, verdes y azules en fotodetectores, el microprocesador puede convertir los valores reflejados en valores XYZ o CIE Lab.

El espectrofotómetro ilumina la muestra y las ondas reflejadas se escanean y se envían a un microprocesador y se pueden presentar como los espectros reflejados, convertidos a valores XYZ o valores CIE Lab. Algunos espectrofotómetros de reflectancia están diseñados para escanear longitudes de onda reflejados desde la superficie usando una rejilla de difracción (AMSA, 2012).

La mayoría de los sistemas de visión como el colorímetro o espectrofotómetro, no son fácilmente accesibles para la mayoría de los investigadores, debido a que son equipos especializados y costosos, por lo que Brosnan & Sun (2002) examinaron el uso de la tecnología de visión artificial para el análisis de alimentos.

Un método simple para medir el color en la superficie de los alimentos es utilizando una cámara digital, y el software de gráficos Photoshop (Adobe Systems Incorporated, San Jose, CA), la cámara digital se utiliza para obtener los valores de color de los píxeles en la superficie de los alimentos y el programa Photoshop se utiliza para manipular esos valores de color para obtener la distribución del color, los promedios, etc. En este método de imagen digital, los costos de equipo y software requeridos son bajos, la configuración experimental y el funcionamiento

son simples, y las mediciones y el análisis a menudo son lo suficientemente sofisticados para la investigación de ingeniería de alimentos.

Se usa una cámara digital de alta resolución (2 megapíxeles o superior) para medir el color al capturar la imagen en color de la muestra del alimento bajo una iluminación adecuada. La imagen capturada es una imagen de mapa de bits que consta de muchos píxeles; cada píxel tiene asignada una ubicación específica y un valor de color. Aunque un escáner plano puede capturar imágenes en color, también puede distorsionar la muestra de alimentos a través del contacto físico, y su fuente de luz no puede controlarse fácilmente (Yam & Papadakis, 2004).

Una vez obtenida la fotografía, esta se pasa al programa Photoshop, en él se utiliza la ventana de histograma para determinar las distribuciones de color a lo largo del eje "x" y "y". En la Figura 7, se muestran las estadísticas (media, desviación estándar, mediana, etc.) del valor de luminosidad, para un área seleccionada en la imagen. La ventana de histograma también puede mostrar las estadísticas de otros dos valores de color (a y b), que se realiza seleccionando a y b en el menú desplegable (canal). Por lo tanto, el color promedio de un alimento se puede obtener fácilmente usando la ventana de histograma.

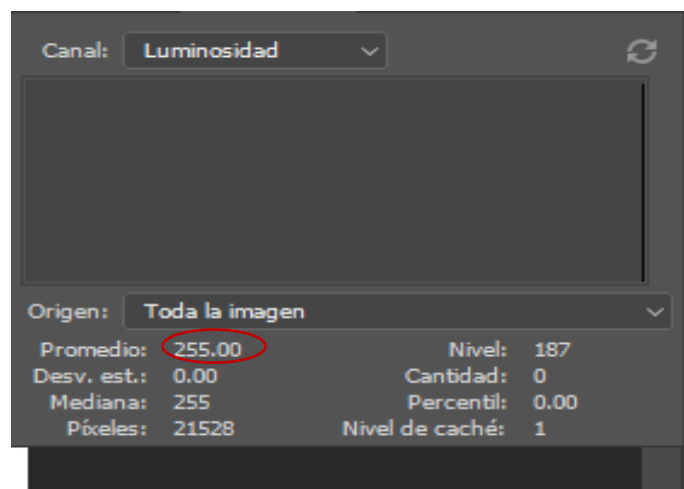


Figura 7: Ventana de histograma en programa Photoshop CS6.  
Fuente: Yam & Papadakis (2004).

Los valores de Luminosidad a y b no son valores de color estándar, sin embargo, se pueden convertir a L\*, a\*, b\* valores usando las siguientes ecuaciones (Yam & Papadakis, 2004):

$$L^* = \frac{\text{Luminosidad}}{255} \times 100$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120$$

El desarrollo del espacio de color CIE Lab permite que el color se exprese en un espacio tridimensional, los cálculos convirtieron estas respuestas en valores L\*, a\* y b\*. Cuando se combinan, estos establecen un espacio de color tridimensional (AMSA, 2012). La ventaja de este método es que proporciona una descripción detallada de la distribución del color de las muestras individuales.

## 1.7 Espectrofotometría

La espectrofotometría estudia los fenómenos de interacción de la luz con la materia. En general, cuando una lámpara ilumina cualquier objeto, pueden suceder algunos fenómenos: La luz puede ser emitida, reflejada, transmitida o absorbida, se basa en la relación que existe entre la absorción de luz por parte de un compuesto y su concentración. Cuando se hace incidir luz monocromática (de una sola longitud de onda) sobre un medio homogéneo, una parte de la luz incidente es absorbida por el medio y otra transmitida, como consecuencia de la intensidad del rayo de luz (Van de Voort & Ismail, 1991).

Cada sustancia tiene su propio espectro de absorción, el cual es una curva que muestra la cantidad de energía radiante absorbida.

Un espectrofotómetro es un instrumento utilizado para determinar a qué longitud de onda la muestra absorbe la luz y la intensidad de la absorción, se define la absorbancia como la cantidad de energía radiante absorbida por una sustancia pura o en solución.



La transmitancia es la razón entre la luz monocromática transmitida por una muestra y la energía o luz incidente sobre ella. Tanto la energía radiante incidente como la transmitida deben ser medidas a la misma longitud de onda.

La luz se puede explicar como un conjunto de radiaciones que se mueven por todo el espacio. Aquellas detectables por nuestro ojo corresponden a la luz visible, pero la mayoría son invisibles para nosotros. Estas radiaciones se pueden describir como partículas y como ondas. La descripción como onda se basa en que la luz consta de campos eléctricos y magnéticos que oscilan sinusoidalmente y en forma perpendicular a la dirección de traslación por el espacio.

La distribución de colores se llama espectro; separar la luz en un espectro se llama dispersión espectral. El espectro está organizado en el orden rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta de acuerdo con las diferentes longitudes de onda de la luz (Figura 8). La luz en la región con las longitudes de onda más largas se ve como roja y la luz en la región con las longitudes de onda más cortas se ve como violeta. El registro de la luz visible es solo una porción muy pequeña de esto, de aproximadamente 380 a 780 nm. La luz reflejada de un objeto y que reconocemos como color es una mezcla de luz de varias longitudes de onda dentro de la región visible (Sensing, 2007).

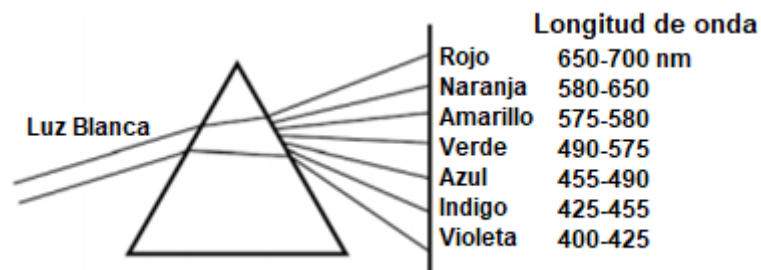


Figura 8: Luz blanca dividida en sus componentes por un prisma.  
Fuente: AMSA (2012).

Para la carne el espectro de absorción para la metamioglobina se encuentra con un pico de absorción en la región azul y un segundo pico más débil en la región del

rojo, con un resultado neto de color pardo. El espectro de absorción de los tres pigmentos se presenta en la Figura 9.

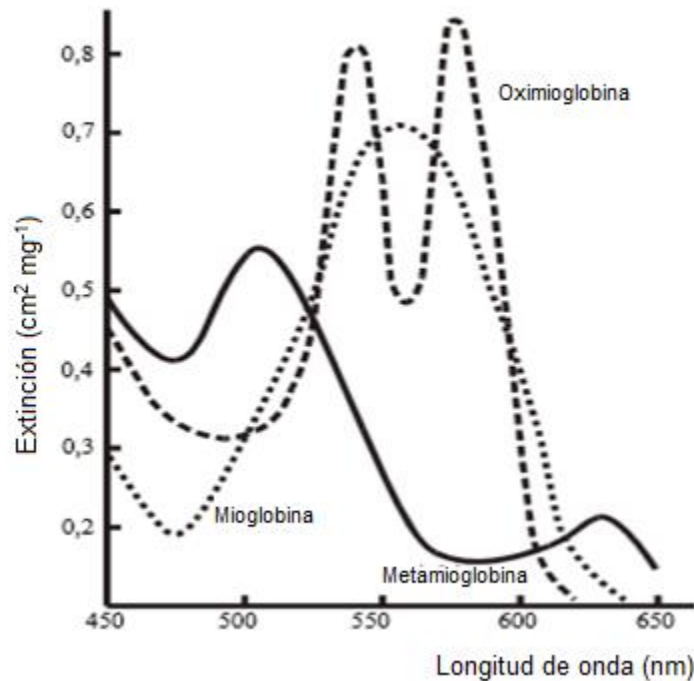


Figura 9: Espectro de absorción de las 3 principales formas de la mioglobina.  
Fuente: Belitz, Grosch & Schieberle, (2009).

## 1.8 Textura

La textura se define como la manifestación sensorial de la estructura del alimento y la forma de reaccionar de este frente a la aplicación de las fuerzas (Szczesniak, 1963), por lo tanto, la textura es una propiedad que engloba el atributo de terneza, o su inverso, la dureza, la sensación de terneza al paladar durante la masticación se debe a la facilidad o dificultad de la penetración de los dientes y de la fragmentación del alimento en cuestión, así como la cantidad de residuo generado al término de la masticación (Prieto, 2006).

De igual forma la textura se puede definir como una propiedad sensorial, que la construyen los elementos estructurales de los alimentos y la podemos percibir por

medio de los sentidos fisiológicos del tacto, la vista y el oído por lo cual el tipo de equipo que se emplea para su determinación instrumental puede ser muy sencillo, de tipo empírico o imitativo (Sánchez, 2001).

### **1.8.1 Análisis de fuerza de corte**

Los texturometros son instrumentos diseñados para aplicar fuerzas o deformaciones a velocidad controlada en el material de prueba y medir la respuesta.

El analizador de textura mide fuerza, distancia y tiempo, proporcionando así un análisis tridimensional del producto, se miden fuerzas en función del tiempo cuando se fijan fuerzas, también se pueden involucrar en las pruebas tiempos de espera o pruebas repetitivas, el control del equipo y la obtención de resultados se efectúa desde una computadora y el contacto con la muestra se hace a través de sensores: puntas, sondas (Sánchez, 2001), cuentan con una amplia gama de dispositivos (conos, cilindros, esferas, punzones, navajas de corte y placas) que permiten efectuar las pruebas bajo compresión, tensión, cizalla, corte, etc.

La prueba de análisis de perfil de textura mide la fuerza aplicada, en donde se indica al texturometro que la punta o sensor aplique fuerza al alimento a cierta distancia a una velocidad dada.

El texturometro captura y almacena los datos, y presenta los gráficos correspondientes de los cuales se extraen valores específicos, así como pendientes o áreas en zonas delimitadas (Figura 10), de estos datos se calculan los parámetros texturales de interés para cada material.

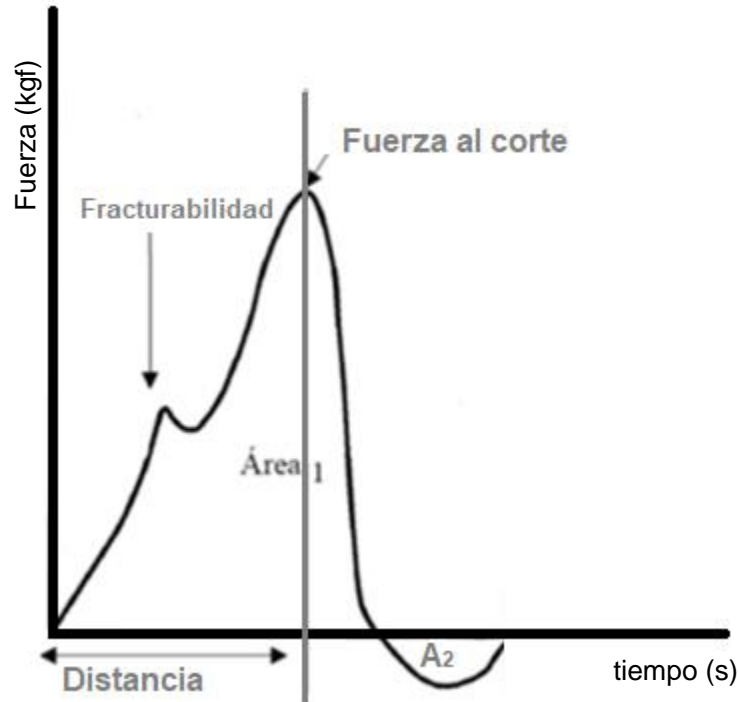


Figura 10: Análisis de perfil de textura para la fuerza al corte  
Fuente: Hleap & Velasco, (2010).

Al graficar la fuerza contra el tiempo lleva a la extracción de 3 parámetros texturales medibles que son (Hleap & Velasco, 2010):

**Fracturabilidad:** Es la primera caída significativa de la curva durante el primer ciclo de compresión, se refiere a la dureza con la cual el alimento se desmorona, cruje o revienta.

**Fuerza al corte:** Fuerza máxima que tiene lugar en cualquier tiempo durante el ciclo de corte, se refiere a la fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar, se expresa en unidades de fuerza, Newton o kgf.

**Adhesividad:** Siguiendo el primer ciclo de compresión se elimina la fuerza cuando el sensor se mueve a su posición original, si el material es pegajoso o adhesivo, la fuerza se convierte en negativa, el área de esta fuerza negativa (área 2), se toma como una medida de la adhesividad a la muestra, representa el trabajo necesario

para despegar el plato de compresión de la muestra o el trabajo necesario para despegar el alimento de una superficie (paladar), se mide en  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$ .

# CAPÍTULO

# II

## **Capitulo II Metodología Experimental**

### **2.1 Objetivo general:**

Evaluar el efecto de la aplicación de diferentes niveles (A-D) de criogel de almidón waxy por ultrasonido, como pretratamiento a la congelación, en cortes de lomo de cerdo, mediante la determinación de color con la técnica de fotografía digital y espectrofotometría y fuerza de corte con un texturometro, para analizar los cambios ocurridos en la carne.

### **2.2 Objetivos particulares:**

1. Comparar las técnicas de medición de color (fotografía digital y colorímetro), determinando los parámetros de perfil de color de 4 tratamientos de carne (carne fresca, carne descongelada, carne con criogel y carne con criogel descongelada), para dar confiabilidad a la metodología propuesta.
2. Analizar el efecto de la incorporación de los 4 niveles de criogel por ultrasonido en cortes de lomo de cerdo, mediante la determinación de los cambios de color y mioglobina, para seleccionar el nivel de criogel que favorezca la conservación de color en la carne.
3. Determinar los cambios en la fuerza de corte de cortes de lomo de cerdo, mediante el uso de un texturometro, para evaluar el efecto del criogel seleccionado en la resistencia de la carne.

En la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo experimental, que desglosa toda la metodología experimental utilizada en el presente trabajo.

## 2.3 Diagrama experimental

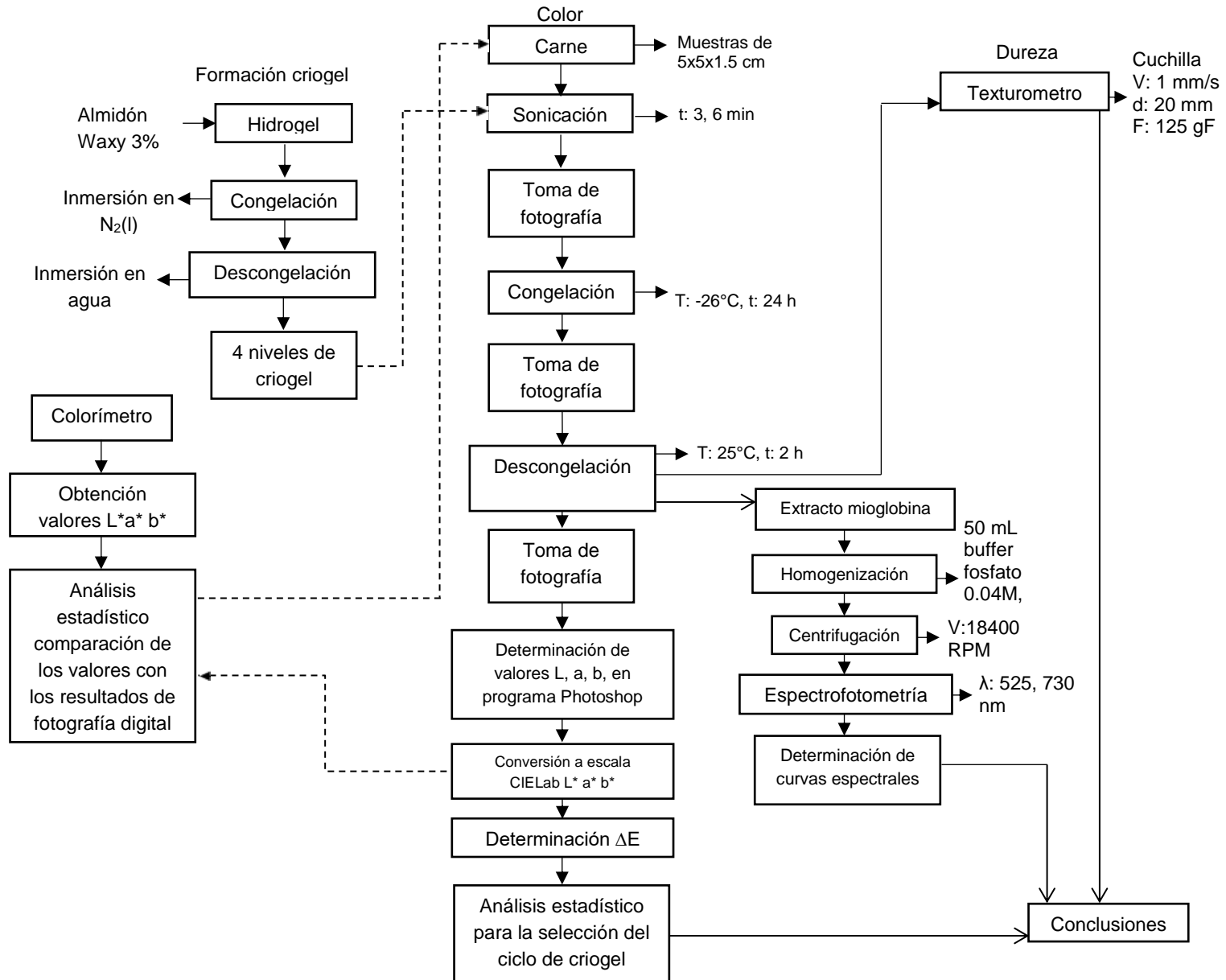


Figura 11: Diagrama experimental.



## 2.4 Diseño de una caja de iluminación para la medición de color por fotografía digital

Para la medición de color con la técnica de fotografía digital, el control de la luz es la parte más importante, y lo más difícil de controlar, si la luz no es homogénea sobre la muestra, el color no se podrá apreciar correctamente en la fotografía, lo que puede resultar en un error experimental en la medición, razón por la cual se diseñó la caja de iluminación con el fin de controlar la iluminación en la carne.

Se construyó una caja de madera con medidas de 40x40x30.5 cm, se colocaron dos focos con inclinación de 45° como se muestra en la Figura 12, las medidas y ángulos de inclinación de los focos se hicieron de acuerdo con lo descrito por Yam & Papadakis, (2004). La temperatura de iluminación de los focos es de 6500 K, la caja es completamente cerrada con el fin de evitar el paso de la luz exterior, el interior de la caja se forro con fomi negro para dar contraste de colores en la fotografía.



*Figura 12: Caja de iluminación para fotografía en la determinación de color.*

Para asegurar que las condiciones de la caja fueran las adecuadas para la medición por fotografía digital, se tomó una fotografía a una hoja de fomi blanco dentro de la caja de iluminación, el valor promedio de luminosidad fue 255 y al convertirlo en valor absoluto de  $L^*$  nos da 100, por lo que significa que el color de la hoja es blanco totalmente (AMSA, 2012) y se puede asegurar que la caja de iluminación es de

utilidad para el control de la iluminación en la toma de fotografía y la medición de color.

## 2.5 Caracterización de la materia prima

Para toda la experimentación se utilizó carne de cerdo fresca obtenida 48 h después de la matanza de cerdos raza PITRAN de machos castrados de 6 meses de edad y un peso aproximado de 110 kg, se utilizó el corte proveniente del músculo *Longissimus thoracis*, de un mismo proveedor.

Se obtuvieron unidades experimentales con las siguientes características: placas de largo 5 cm, ancho: 5 cm, espesor: 1.5 cm, peso  $50 \pm 2$  g.

Se determinó el pH en el lomo de cerdo con un Potenciómetro H199163 (Hanna Instruments) durante toda la experimentación, con el fin de verificar las condiciones de obtención de la carne.

La humedad de la materia prima se determinó con la técnica de secado en estufa según la norma NMX-F-544-1992 que consiste en someter una muestra de 2 g en una charola de aluminio, a 100 °C durante 24 h; la humedad se obtuvo con la siguiente ecuación.

$$\% \text{Humedad} = \frac{CM - CMS}{PM} \times 100$$

En donde:

CM= Peso de la placa con muestra húmeda (g).

CMS= Peso de la placa con muestra seca (g).

PM= Peso de la muestra (g).

Ambas pruebas se realizaron por triplicado y se obtuvo su media, desviación estándar y coeficiente de variación.

## **2.6 Formación del criogel**

Se utilizó almidón de maíz WAXY (100% amilopectina, Firm-Tex, Ingredion, México), se dispersó en agua a una concentración de 3% m/v con agitación magnética a 70°C durante 2 horas.

Posteriormente se formaron los criogeles mediante congelación y descongelación; la congelación se llevó a cabo mediante los protocolos descritos por Lozinsky *et al.* (2008), Giannouli & Morris (2003) con congelación criogénica por inmersión en nitrógeno líquido a  $-150 \pm 3$  °C por 10 min y descongelación por inmersión en agua a  $50 \pm 5$  °C por 30 min.

## **2.7 Comparación de las técnicas de medición de color**

Para la comparación de las pruebas de medición de color, se determinaron los parámetros de perfil de color de muestras de carne fresca, carne descongelada, carne con criogel y carne con criogel descongelada. Para la carne con criogel se tomaron únicamente las muestras del nivel 1 y 4, primero se hizo la medición utilizando la técnica de fotografía digital. La metodología se explicará más adelante a detalle.

Para medición con el colorímetro, se utilizó un espectro colorímetro Konica Minolta CM-600d (Figura 13) y la metodología propuesta por AMSA, (2012), primero se calibró el colorímetro con una tapa de calibración blanca del mismo equipo, una vez calibrado, se colocaron las muestras sobre una superficie plana y sobre ellas se colocó el cuarzo antirreflejante, se realizó la medición utilizando el software SpectraMagic NX.



*Figura 13: Espectro colorímetro Konica Minolta CM-600d.*

Estas pruebas se realizaron por triplicado, obteniendo media, desviación estándar y coeficiente de variación. Los resultados se analizaron con la prueba de hipótesis de comparación de dos medias, se obtuvieron los valores la diferencia entre las técnicas, así como los intervalos de confianza con 95%, que proporcionan un intervalo de valores probables para la diferencia entre las medias de las dos técnicas, nos brinda mayor confiabilidad para comparar las dos muestras, pues nos da la diferencia que puede existir entre ellas.

De esta manera se podrá establecer que la prueba de fotografía digital sea o no confiable para la medición del color durante el resto de la experimentación.

## **2.8 Incorporación del criogel con ultrasonido**

Se realizó el pretratamiento con sonicación de los criogeles en el lomo de cerdo, con un ultrasonido de sonda marca Hielscher modelo UP200S DE 25 kHz, con un sonotrodo S14 de 1 L (Figura 14). En lo que corresponde a amplitud, ciclos y tiempo de ultrasonido, se decidió utilizar una amplitud fija, ciclos variables y dos diferentes tiempos de 3 y 6 minutos, esperando variaciones en la penetración del criogel en la carne, sin afectar a su estructura y a la vez al color, posteriormente se congelaron las muestras a  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 h; finalmente se descongeló a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 2 h, llevándose a cabo las siguientes actividades.

\*Referirse a la patente MX/a/2017/014304 para las condiciones de aplicación de criogeles y US.



Figura 14: Ultrasonido de sonda Hielscher UP200S.

## 2.9 Determinación de parámetros de perfil de color

En la determinación de los parámetros  $L^*$   $a^*$   $b^*$ , se aplicó la técnica de imagen digital, se tomaron fotografías a las muestras después de la sonicación, congelación y descongelación, así como a carne sin tratamiento (muestra control) con una cámara digital Nikon Coolpix S2800, y con el uso de la caja de iluminación, una vez tomada la fotografía, la imagen se convirtió en formato TIFF, posteriormente se abrió el archivo en el programa Adobe Photoshop C6 2017, se seleccionaron 5 áreas de la imagen con el programa, con el fin de determinar la mejor área de distribución de color como se muestra en la figura 15.

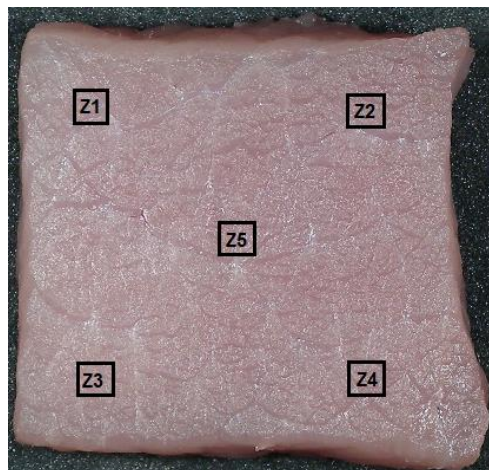


Figura 15: Zonas de medición de color.

Se obtuvieron los parámetros promedios de L a b, estos valores no son valores estándar por lo que se convierten en los valores de L\* a\* b\* de la escala CIELab con las siguientes ecuaciones (Yam & Papadakis, 2004):

$$L^* = \frac{L}{255} \times 100$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120$$

El parámetro L\* se refiere a la luminosidad o brillo de la imagen, tomando valores de 0 (negro) al 100 (blanco), los parámetros a\* y b\* se refieren a la saturación de color, el primero va del rojo con valores positivos a verde con valores negativos y el segundo va del amarillo con valores positivos a azul con valores negativos.

Se calcularon los valores promedios, desviación estándar y coeficiente de variación, de las 5 zonas para cada muestra, a partir de esos valores se determinó el  $\Delta E^*$  entre la media de cada tratamiento y la muestra control, este corresponde al cambio de tonalidad o a la diferencia de color entre dos muestras.

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

La prueba se realizó por triplicado para cada corrida, se analizaron los resultados de  $\Delta E^*$ , en el programa Minitab 17, aplicando un análisis factorial completo, de manera que se pueden probar todos los factores de la experimentación, determinando la interacción que hay entre sí, de esta forma se da mayor confiabilidad para la selección del ciclo de criogel que tenga mayor efecto en el cambio de color de la carne con respecto a la muestra control, integrando todos los factores, como el daño por la sonicación y la congelación descongelación de las muestras.

### **2.9.1 Determinación del espectro de extracto de mioglobina**

Para la extracción de mioglobina según el método de Van Laack *et al.* (1996), se homogenizan 5 g de carne molida en 50 mL buffer fosfato de sodio 0.04 M, pH 6.8 usando para ello una licuadora. Una alícuota de 50 mL de la mezcla se centrifugó por 30 minutos a 18400 RPM en una ultracentrífuga Marca Beckman, modelo L8-80M, usando un rotor tipo SW28, el sobrenadante se pasó por papel filtro y se determinó la absorbancia a 525 y 730 nm con un espectrofotómetro UV/Vis Marca Beckman, modelo DU 650.

Una vez obtenidos los valores de absorbancia se determinaron las curvas espectrales para determinar el tipo de mioglobina presente en la carne sonicada.

### **2.10 Determinación de fuerza de corte**

Para el análisis de la resistencia al corte, se utilizó un texturometro Brookfield CT3 con una cuchilla como aditamento, se realizó el corte en el centro de la muestra, colocada con las fibras perpendiculares a la cuchilla, con las siguientes condiciones: velocidad de 1 mm/s y distancia recorrida de 20 mm, carga de celda de 125 gF.

Se obtuvieron los resultados de carga (gF) y tiempo (s) de las muestras con el ciclo seleccionado en las actividades anteriores, de igual forma para carne fresca (muestra control), se determinó el efecto del criogel en la dureza de la carne considerando el pico máximo (fuerza máxima) resultante del esfuerzo al corte, así como el tiempo que tardó la cuchilla en penetrar a la carne.

En la Tabla 1 se presentan los tratamientos y variables de operación utilizados en toda la experimentación, con la finalidad de identificar la cantidad de muestras analizadas para cada tratamiento y el número de corridas experimentales, cada prueba se realizó por triplicado obteniendo promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

Tabla 1: Combinación de variables para el análisis de las muestras.

Tratamientos	Nivel de criogel	Ciclo de us variables	Tiempo de us	Colorímetro	Color (Fotografía Digital)	Espectro	Dureza		
Carne sonicada	A	1	3 min	x	x				
			6 min	x	x				
		2	3 min	x	x				
			6 min	x	x				
		B	1	3 min		x			
				6 min		x			
	2		3 min		x				
			6 min		x				
	C	1	3 min		x				
			6 min		x				
		2	3 min		x				
			6 min		x				
	D	1	3 min	x	x				
			6 min	x	x				
		2	3 min	x	x				
			6 min	x	x				
	Carne congelada	A	1	3 min		x			
				6 min		x			
			2	3 min		x			
				6 min		x			
			B	1	3 min		x		
					6 min		x		
		2		3 min		x			
				6 min		x			
C		1	3 min		x				
			6 min		x				
		2	3 min		x				
			6 min		x				
D		1	3 min		x				
			6 min		x				
		2	3 min		x				
			6 min		x				
Carne descongelada		A	1	3 min	x	x	x	x	
				6 min	x	x	x	x	
			2	3 min	x	x	x	x	
				6 min	x	x	x	x	
			B	1	3 min		x	x	x
					6 min		x	x	x
		2		3 min		x	x	x	
				6 min		x	x	x	
	C	1	3 min		x	x	x		
			6 min		x	x	x		
		2	3 min		x	x	x		
			6 min		x	x	x		
	D	1	3 min	x	x	x	x		
			6 min	x	x	x	x		
		2	3 min	x	x	x	x		
			6 min	x	x	x	x		



Como se observa, el análisis de color con la técnica de fotografía digital se realizó a todos los tratamientos y variables en cambio para el colorímetro sólo se utilizaron las muestras de carne sonicada y descongelada para los niveles de criogel A y D debido a que sólo se quería comparar la técnica con los resultados de fotografía digital, para las pruebas de espectrofotometría y esfuerzo al corte sólo se analizaron las muestras de carne descongelada debido a que son pruebas destructivas y se quería analizar el cambio en la carne provocado por la sonicación y la congelación-descongelación.

Finalmente se analizaron un total de 224 muestras de toda la experimentación.

# **CAPÍTULO**

# **III**

## Capítulo III: Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos experimentalmente para cada uno de los objetivos planteados.

### 3.1 Caracterización de la materia prima

Se determinaron como parte de la caracterización de la materia prima, el pH y % humedad de la carne, los resultados se muestran en la tabla 2, los cuales fueron contrastados con los valores descritos por Moreno (2006); Andújar, Pérez & Venegas (2003) y Braun & Pattacini (2011), no hay diferencias significativas por lo que los valores obtenidos son confiables, ya que se encuentran dentro los parámetros referidos.

Tabla 2: Características de la materia prima.

	% Humedad	pH
<i>Promedio</i>	72.01	5.8
<i>Coefficiente de variación</i>	0.74	1.72

### 3.2 Comparación en la medición de color

Se determinaron los valores de la diferencia e intervalos de confianza para los resultados de L\*, mostrados en la Tabla 3, se decidió utilizar únicamente los resultados para la luminosidad, porque es uno de los parámetros más importantes debido a que a partir de ella podemos deducir qué tan clara o tan oscura es la muestra, además que para la técnica de fotografía digital, es un parámetro de suma importancia, ya que sin luz no hay color, razón por la cual se debe tener un correcto manejo del tipo de luz, y la uniformidad de esta sobre la muestra, para una mejor apreciación del color en la fotografía.

Tabla 3: Intervalos de confianza para la diferencia en la luminosidad entre las técnicas de medición de color.

Tratamiento	Condiciones de sonicación (ciclo, minutos)	Diferencia	Intervalo de confianza
Fresca	x	21.85	19.19 - 24.5
Descongelada s/criogel	x	41.06	38.19 - 43.92
Sonicada c/criogel Nivel A	1, 3	4.71	1.25 - 8.17
	1, 6	24.98	20.99 - 28.96
	2, 3	0.7	0.143 - 5.253
	2, 6	1.6	0 - 5.82
Descongelada c/criogel Nivel A	1, 3	28.95	25.92 - 31.98
	1, 6	12.65	8.48 - 16.84
	2, 3	29.67	28.32 - 31.01
	2, 6	33.2	26.05 - 40.35
Sonicada c/criogel Nivel D	1, 3	7.13	0.76 - 13.49
	1, 6	14.23	8.79 - 19.68
	2, 3	14.47	11.38 - 17.56
	2, 6	12.89	8.03 - 17.74
Descongelada c/criogel Nivel D	1, 3	11.74	3.45 - 20.04
	1, 6	17.18	13.19 - 21.18
	2, 3	26.72	21.10 - 32.35
	2, 6	15.53	11.86 - 19.20

Podemos observar que los resultados de la diferencia para carne fresca son de 21.85, y el intervalo de la diferencia va de 19.19 - 24.5, con esto se asegura con un 95 % de confianza que la diferencia entre las dos técnicas se encuentra entre ese intervalo, en la Figura 16 se observa de manera clara la diferencia de los valores que hay entre las dos técnicas, donde los resultados para fotografía digital son visiblemente superiores a los del colorímetro.

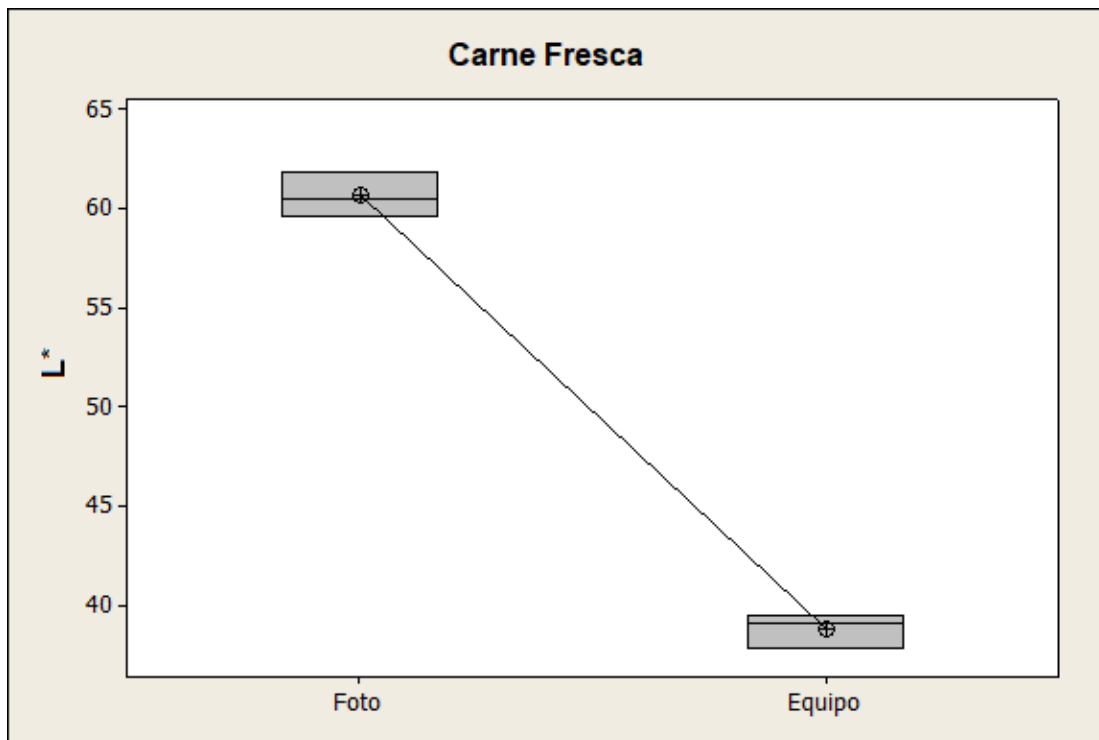


Figura 16: Esquema de cajas de L\* para carne fresca.

Los tratamientos que presentan menor diferencia son los de la carne sonicada, por ejemplo, la carne sonicada con criogel Nivel A con el ciclo 1 y 6 minutos de sonicación, el valor promedio de la diferencia es de 1.6, por lo que se puede decir con un 95% de confianza que la diferencia va de 0 a 5.82.

Como se muestra en la Figura 17, el valor más alto de L\* es de 47 para fotografía y de 46 para colorímetro, por lo que los resultados son muy similares, esto pudo deberse a que se retiraba el exceso de criogel en la superficie de la carne después de la sonicación, lo que pudo beneficiar a la medición, dando resultados más cercanos a los obtenidos con el colorímetro.

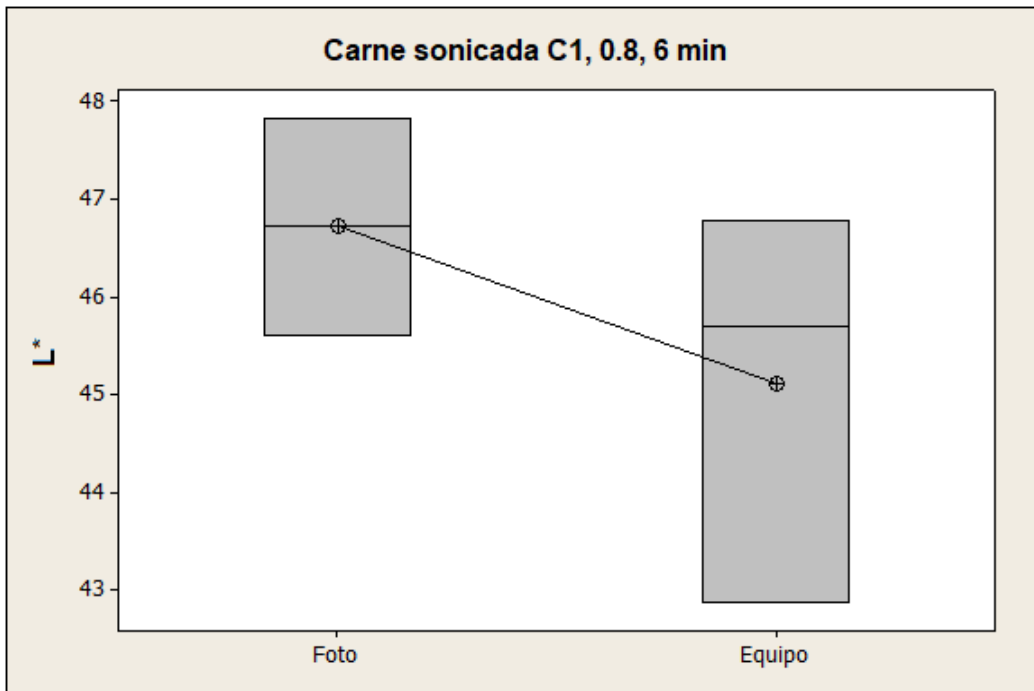
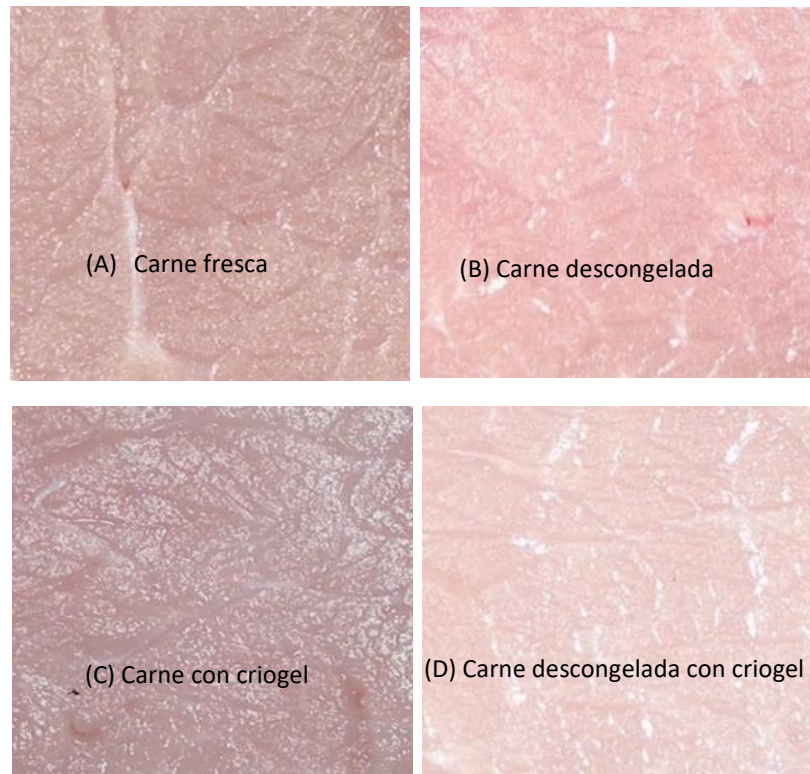


Figura 17: Esquema de cajas de  $L^*$  para carne sonicada C1, 0.8, 6 min.

Así mismo los tratamientos que mayor diferencia tuvieron son los de la carne descongelada con y sin criogel, esto se atribuye a la humedad en la superficie de la carne, que provocaba la reflexión de la luz que iluminaba la muestra, alterando la imagen y la medición de la luminosidad, como se observa en la Figura 18, donde los puntos más blancos representan a la reflexión de la luz por la humedad, dando como resultado una apreciación mas clara de la imagen en el programa Photoshop.



*Figura 18: Fotografías de los diferentes tratamientos de carne.*

De igual forma hay que tomar en cuenta la amplitud que existe en la caja de iluminación, con respecto al espacio de medición con el colorímetro, ya que en el equipo se delimita a un espacio de la carne y con la fotografía, la luz abarca más espacio, lo que puede provocar que haya diferencia entre las dos mediciones.

No es posible garantizar la exactitud de la técnica de fotografía digital, pero resulta viable para la medición de color, en ausencia de un equipo de exactitud como un colorímetro, ya que aun con la diferencia que presenta, retirando la humedad superficial y manteniendo uniforme la iluminación de las muestras, esta diferencia se reduce, dando confiabilidad a la medición del color, como se mencionó anteriormente, además de que los valores de las repeticiones no presentaban diferencias significativas, por lo que aunque no llega a reemplazar a un equipo, es posible realizar mediciones confiables y útiles.

### 3.3 Parámetros de perfil de color

El color de la carne está influenciado principalmente por los pigmentos dentro de ella, estos son la mioglobina y la hemoglobina que son los encargados de dar a la carne el color rojo (Lindahl, 2005). Se obtuvieron los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  para cada tratamiento y cada variable de la experimentación, se realizó un diseño factorial completo para su análisis, este nos brinda mayor confiabilidad en el análisis de los resultados debido a que muestra la interacción de las variables y los tratamientos utilizados en la experimentación, de igual forma se determinó el  $\Delta E^*$ , que es la diferencia de color entre dos muestras, este se obtuvo a partir de los promedios de los valores de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , en contraste con la muestra control, se analizaron los resultados de la misma forma, para el diseño factorial se analizaron un total de 144 muestras.

La Figura 19 muestra los resultados para las interacciones de  $L^*$ , ésta determina la claridad u oscuridad de la muestra, por lo que se convierte en uno de los parámetros más importantes, ya que a partir de ella podemos deducir la pérdida de color en la carne.



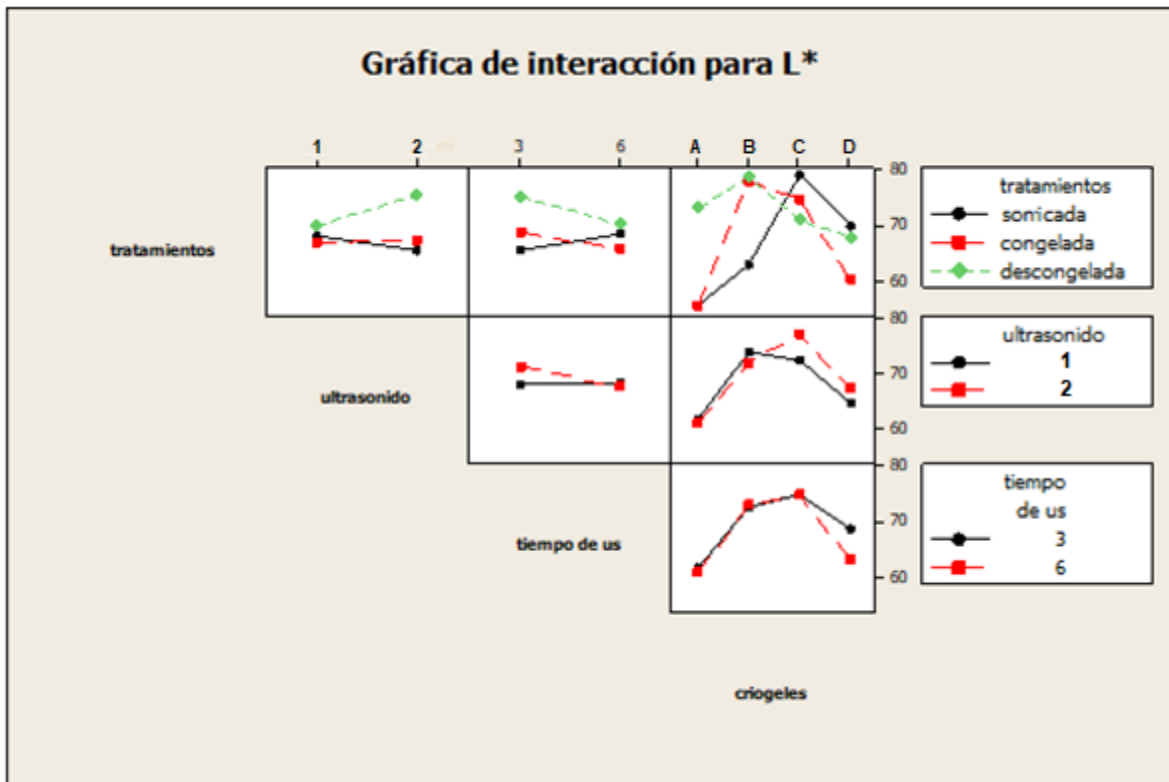


Figura 19: Esquema de interacción para L\*.

Podemos observar que los valores de L\*, son mayores para el caso de la carne descongelada, esto se atribuye al daño causado por la congelación-descongelación, que afectan principalmente al contenido de humedad y la disminución en su capacidad de retención de agua, que provoca la generación de exudados.

La cantidad de exudado está influenciada por el tamaño y distribución de los cristales, ya que estos alteran la estructura de la fibra muscular, y provocan la desnaturalización de las proteínas, así mismo la mioglobina se ha identificado en el exudado mediante electroforesis en gel, esto explica en el cambio en la estabilidad del color de la carne después de la congelación y la descongelación (Añón & Cavelo, 1980). También la desnaturalización del resto de globina de la molécula tiene lugar en algún momento durante la congelación, el almacenamiento congelado y la descongelación (Calvelo, 1981). La desnaturalización provoca la autooxidación de la mioglobina, lo que conduce a una pérdida de color. El US también tiene un efecto en la presentación de color, debido a que la presión acústica tiene efecto en la carne

por la cavitación gaseosa, la generación y evolución de microburbujas, estas al alcanzar un tamaño crítico colapsan violentamente, causando la liberación de toda la energía acumulada, ocasionando incremento de temperatura, así como un choque mecánico provocado por el mismo colapso de las burbujas, ocasionando ruptura en la estructura de la carne (Robles & Ochoa, 2012), esto a su vez causa un cambio en las propiedades de las proteínas, lo que puede causar una alteración en el color de la carne (Jayasooriya, 2004).

En cambio, para la carne congelada, los valores de luminosidad son menores debido a que los cristales que se forman en la superficie provocan una menor absorción de la luz.

Los parámetros de color varían según el contenido y la forma de mioglobina presente (Fernández *et al.*, 2000; Lindahl *et al.*, 2001), en la Figura 20, se puede observar los valores para la interacción de  $a^*$ , podemos observar que los resultados para los tratamientos son positivos, por lo que indica que el color de la carne tiene tendencia al color rojo, la carne congelada tiene los valores más altos para  $a^*$ , esto puede deberse a que está influenciada a la cantidad de contenido de mioglobina en la carne (Lindahl, 2005), por lo que la congelación provoca que haya menos agua disponible por la formación de cristales aumentando la concentración de solutos en la superficie, provocando un apariencia más rojiza (Leygonie, Britz & Hoffman, 2012).

Para la carne descongelada, se observa que los resultados son inferiores, respecto a los demás tratamientos, lo que demuestra la pérdida de color en la carne descongelada provocada por el ultrasonido y la congelación.

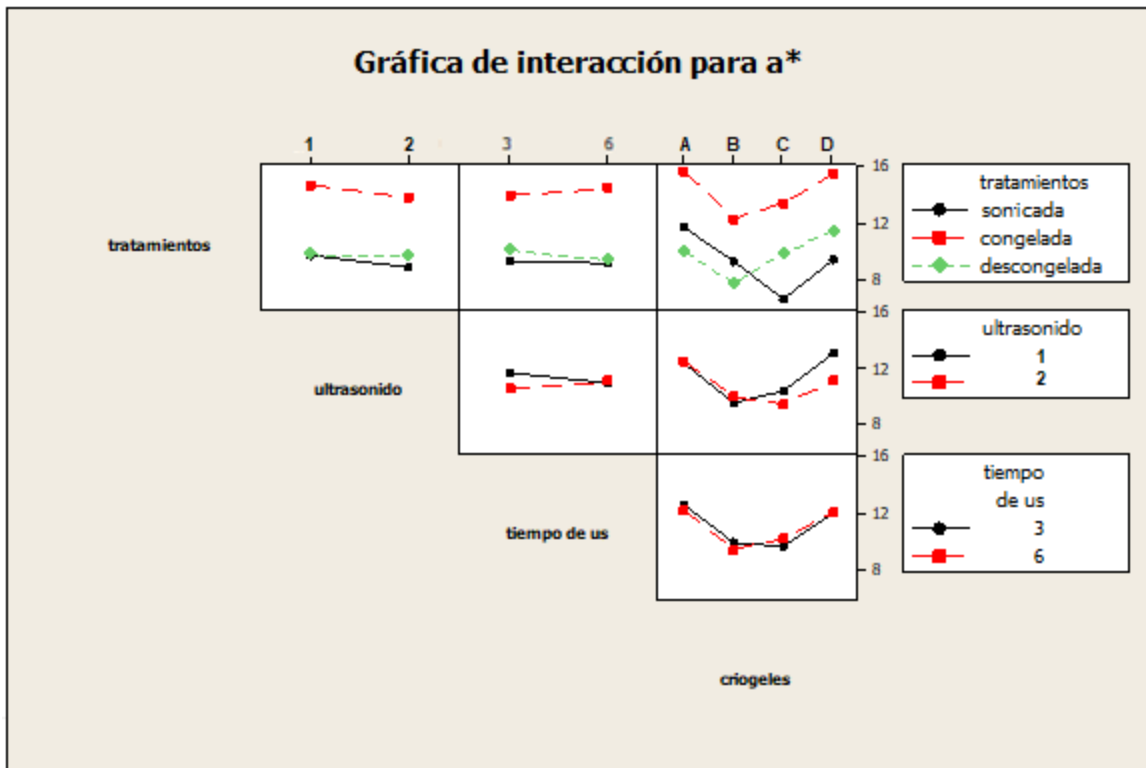


Figura 20: Esquema de interacción para a\*.

También se puede observar que la variación en los ciclos y tiempo de US no presentan diferencias significativas para cada tratamiento, lo que nos indica que no tienen efecto en el cambio de color de la carne, si bien el ultrasonido afecta a las propiedades de la carne, el cambio en estos no tuvo efecto en las propiedades de la carne.

Para los resultados de b\* se presenta la Figura 21, donde se observa que la carne sonicada y descongelada no presentan diferencias entre sí, en comparación a la carne congelada, que presenta los valores más altos, debido a la acumulación de metamioglobina en la superficie de la carne, que puede ser causada por la disminución de la actividad reductora de la metamioglobina propuesta por Livingston & Brown (1981), donde hablan de la existencia de un sistema enzimático capaz de reducir la metamioglobina a mioglobina en carne fresca, pero a medida que la carne es congelada esta actividad reductora disminuye (Abdallah *et al.*, 1999), debido a la

presencia de metamioglobina el color amarillo en la carne congelada es mayor, que en combinación con el color rojo provocan un color marrón en la carne.

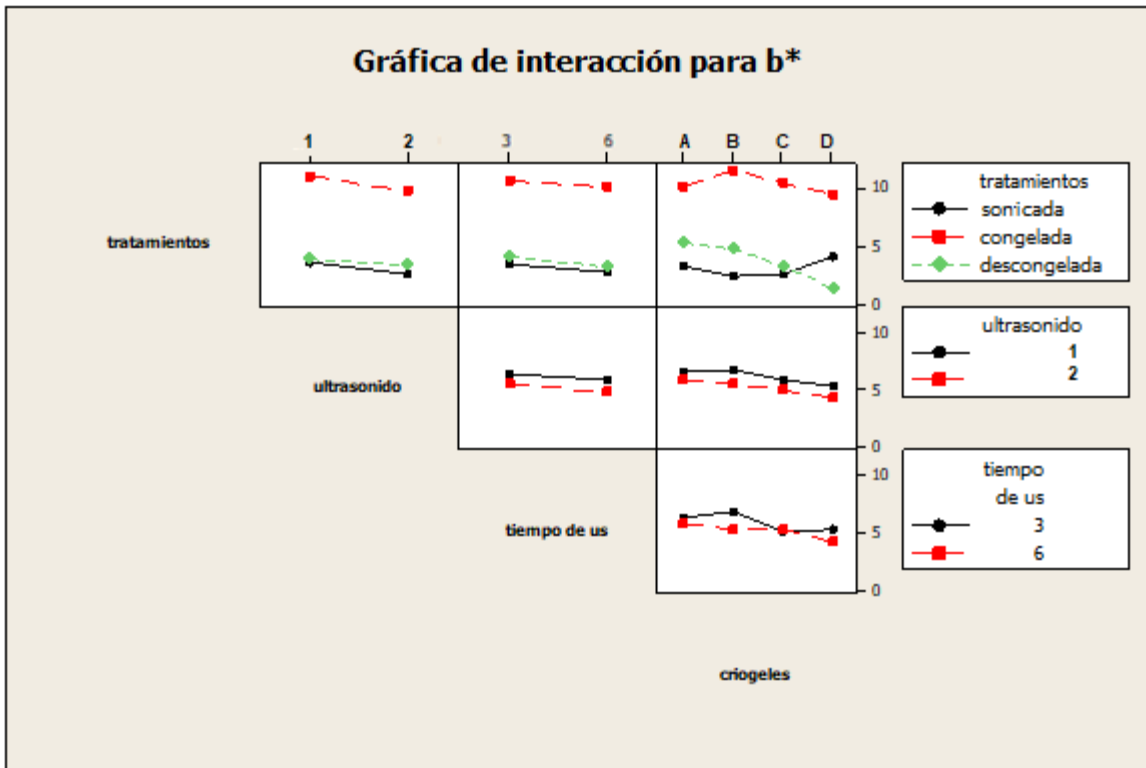


Figura 21: Esquema de interacción para b\*.

La alteración de b\* puede ser un efecto de la oxigenación-desoxigenación o un efecto de la oxidación a metamioglobina (Johansson, 1989), por lo que su valor está influenciado mayormente por la presencia de las diferentes formas de mioglobina en comparación con a\* que está influenciada por el contenido del pigmento.

Lo anterior es importante para poder entender los cambios que pueden ocurrir en el color de la carne, sin embargo, para poder explicar el efecto que tiene la aplicación del criogel, se determinaron los  $\Delta E^*$  de cada tratamiento y cada ciclo de criogel, que se refiere al cambio en la percepción de color con respecto a la carne fresca.

Según la ISO12647-2 los valores de  $\Delta E^*$  van de 0 a 5 donde 0 significa que son casi imperceptibles las diferencias entre las muestras y 5 donde son más apreciables las diferencias, pero aun aceptables ya que se encuentra en el límite de diferencia de

color, valores mas altos de 5 se refieren a que son muestras con diferencias totalmente perceptibles.

En la Figura 22 se presentan las interacciones de los resultados de  $\Delta E^*$  para cada tratamiento así como con cada ciclo de criogel, los criogeles producen un efecto de protección en la carne debido a su capacidad para interactuar con el agua de esta, lo que provoca que los cristales de hielo modifiquen su crecimiento, formando enlaces con el agua extracelular de la carne, evitando el daño en su estructura y la desnaturalización de sus proteínas, provocando la pérdida de su componentes por el exudado.

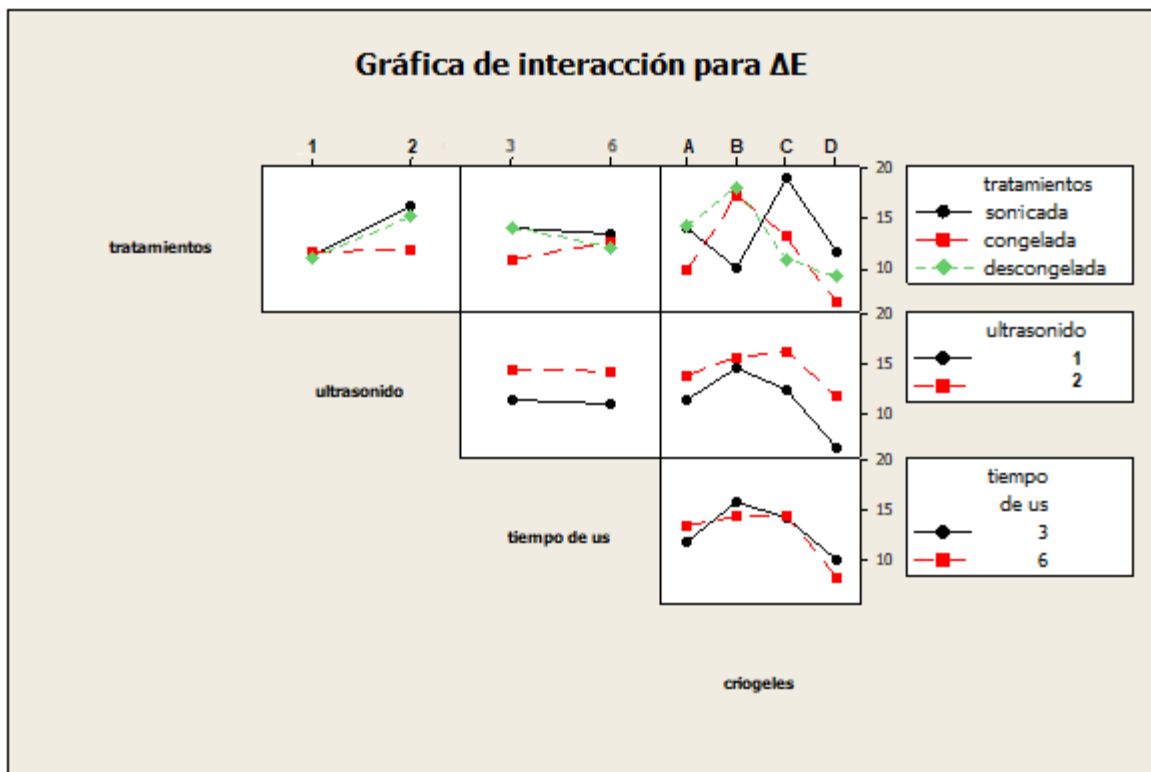


Figura 22: Esquema de interacción para  $\Delta E^*$ .

Se puede observar para todos los tratamientos y niveles de criogel los valores están por encima de los 5, por lo que todos tienen diferencias perceptibles con respecto a la carne fresca, sin embargo, el nivel D de criogel, es el que mayor efecto tuvo en la carne, ya que tuvo el  $\Delta E^*$  más bajo, siendo 6.6 para carne congelada, si bien tiene diferencias perceptibles, se considera el que mayor efecto de protección tuvo en la

carne, por ser el ciclo que menor alteraciones en el color tuvo con respecto a la carne fresca, esto se puede atribuir a la capacidad del biopolímero de cambiar su configuración con nivel de criogel, gracias a la presencia de grupos carboxilo que salen de la estructura y los grupos hidroxilo de la cadena (Zhang, Zhang & Wu, 2013), el cambio en los niveles de criogel aumenta el carácter cooperativo de las interacciones entre cadenas en los nudos de unión de la red de polímero (Lozinsky, Damshkaln & Kurochkin, 2008).

Esto quiere decir que debido a la presencia de grupos carboxilo e hidroxilo en el almidón, provoca que las uniones intermoleculares que se dan con la carne sean tipo puentes de hidrógeno, por lo que se puede decir que el nivel D de criogel posee una estructura con mayor capacidad de interacción con el agua extracelular de la carne, controlando el crecimiento libre de los cristales, evitando el daño mecánico en su estructura y así la pérdida de sus componentes por exudados, en comparación con los demás niveles, la reorganización de su estructura no favoreció a esa interacción y capacidad de retener agua libre de la carne, siendo el nivel C el que tuvo los valores más altos, teniendo diferencias totalmente apreciables con respecto a la carne fresca.

### **3.3.1 Extracto de mioglobina**

El color de la carne es un atributo de calidad importante para el consumidor (Risvik, 1994), los valores  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  describen el color de la carne, pero no revelan el origen del color observado en términos de especies de mioglobina, por lo tanto, existe la necesidad de evaluar la especie de mioglobina como un complemento de los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ .

El color de la carne fresca es reversible y dinámico con la interconversión constante de principalmente las tres formas: desoximioglobina (Mb), oximioglobina (MbO) y metamioglobina (MetMb) (Lindahl, 2005), un color rosa brillante (rojo) se relaciona con MbO, mientras que el color de Mb y MetMb es más grisáceo o rosado pardusco (marrón). El estado de las proteínas musculares afecta la opacidad y translucidez de la carne (Lindahl *et al.*, 2001).

En la Figura 23 se presentan los resultados de absorbancia de las muestras de carne de los cuatro ciclos de criogel, así como de la carne fresca (muestra control) y carne descongelada sin criogel, esto para determinar los cambios en la mioglobina de la carne producidos por los tratamientos, y el efecto que pueda tener el criogel sobre los cambios en la especie de la mioglobina, se observa que la curva característica de las muestras es para metamioglobina como lo reportan Belitz, Grosch & Schieberle, (2009), donde mencionan que la metamioglobina tiene una banda más alta de absorción en la región azul a 400 nm y una segunda banda más débil en la región del rojo a 500 nm, con un resultado neto de color marrón (Andújar, Pérez & Venegas, 2003).

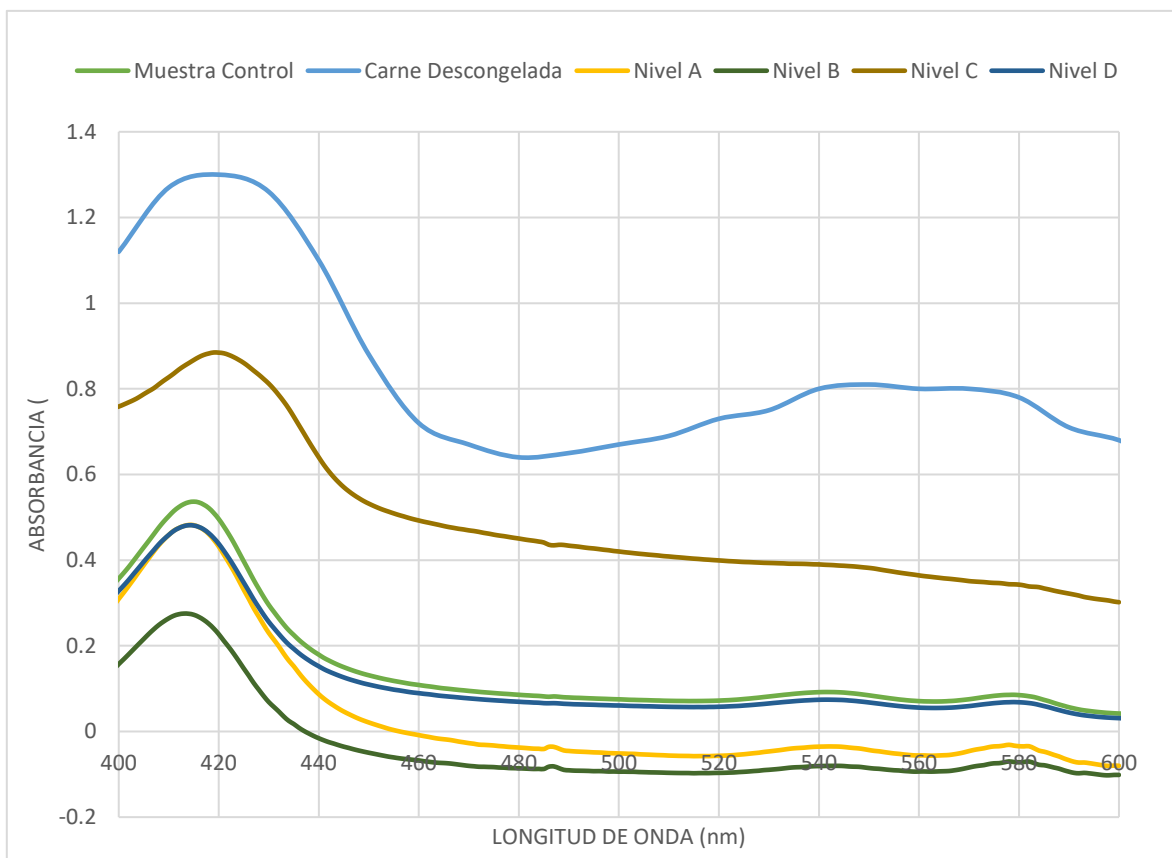


Figura 23: Curva espectral de absorción para los diferentes niveles de criogel y muestra control.

También se puede ver que la muestra control como el nivel D tienen la misma tendencia en cuanto al espectro de absorción, por lo que se puede decir que no presentan diferencias significativas entre sí, el nivel A también presenta valores de

absorbancia con respecto al nivel D, sin embargo, la aplicación de criogel no tiene un efecto en la forma de la mioglobina presente en la carne, ya que no produce cambios en la oxidación o reducción de la mioglobina, por lo que los diferentes niveles presentan la misma tendencia que la carne fresca y descongelada, pero a diferentes valores de absorbancia.

La forma de mioglobina está determinada por el contacto de la carne con el aire, esto provoca que la desoximioglobina, forme oximioglobina, por la oxigenación del pigmento, y la metamioglobina se forma por exposición prolongada de la oximioglobina al oxígeno (Díaz, 2001), también se ha encontrado que la congelación acelera la oxidación de los lípidos, cuando se inicia la oxidación de lípidos, se produce la formación de componentes capaces de reaccionar con la oximioglobina, que a su vez conduce a la formación de metamioglobina, en consecuencia, la oxidación se puede comparar con una reacción en cadena dentro de la carne, iniciada por la fracción lipídica y transportada a la fracción de mioglobina (Leygonie, Britz & Hoffman, 2012).

Por lo que el criogel no tiene efecto en la modificación de las diferentes formas de mioglobina, sino más bien la exposición de la carne al oxígeno o al efecto de reducción provocado por la congelación o por la naturaleza misma de la carne y la exposición prolongada al aire.

Finalmente se seleccionó el nivel D de criogel, siendo el que mayor efecto de protección tuvo en la carne, evitando la pérdida de color, ya que la redistribución de su estructura por el aumento de ciclos, benefició a la formación de enlaces con el agua de la carne, teniendo menor disponibilidad de agua para la formación de cristales y así dañando en menor proporción a la estructura de la carne, disminuyendo la pérdida de sus componentes y por consiguiente al color de la carne, dando los valores más bajos en la diferencia de color con respecto a la carne fresca, así como la similitud en la absorbancia con el espectro de mioglobina de la carne fresca.



### 3.4 Fuerza de corte

Se ha identificado en la literatura que la terneza de la carne aumenta con la congelación y descongelación cuando se mide con fuerza máxima. Se cree que el mecanismo implicado en el ablandamiento es una combinación de la ruptura de las fibras musculares por reacciones enzimáticas durante la proteólisis y la pérdida de la integridad estructural causada por la formación de cristales de hielo.

Los resultados obtenidos para la resistencia al corte de carne de cerdo se muestran en la Figura 24, se presentan las curvas para carne fresca y descongelada, así como para la muestra del nivel D de criogel seleccionado anteriormente.

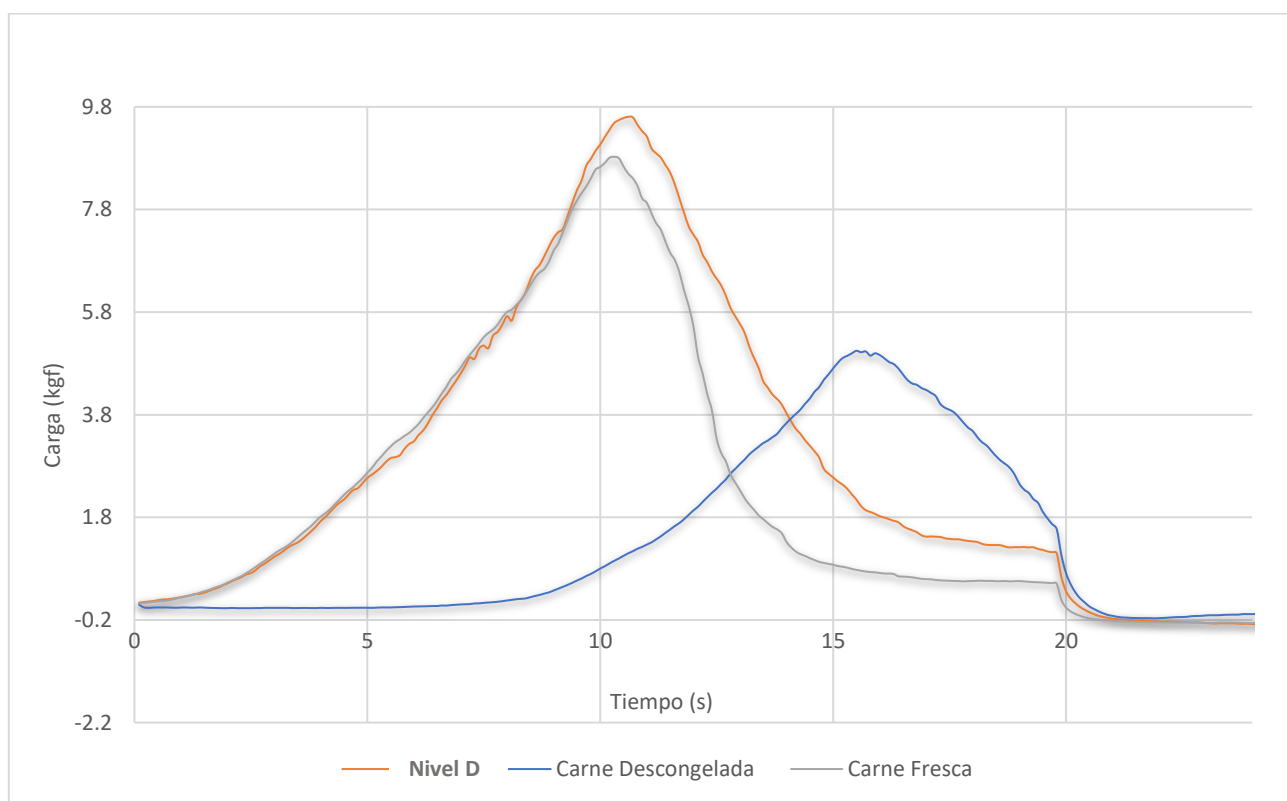


Figura 24: Gráfica de resistencia al corte para carne sonicada descongelada (nivel D) y para carne fresca y descongelada.

Se observa que la carne descongelada tiene una disminución en el pico de fuerza máxima con respecto a la carne fresca, causado por la formación de cristales grandes y extracelulares lo que provoca que la estructura física se vea afectada, rompiendo en gran parte las miofibrillas, por lo que la disminución en la fuerza de

corte se atribuyó a la pérdida de la resistencia de la membrana debido a la formación de cristales de hielo al reducir la fuerza necesaria para cortar la carne (Lui *et al.*, 2010), sin embargo, existe un desplazamiento en el tiempo de compresión, lo que sugiere que la superficie de la carne mostro mas resistencia para comenzar el corte, esto pudo deberse a la perdida de humedad, y el desplazamiento de sus componentes a la superficie de la carne, causando que se requiera más tiempo para lograr el corte en la carne (Lagersted *et al.*, 2008).

Se observa un aumento en la fuerza de corte, en el nivel D (9.45 kgf) con respecto a la carne fresca (8.64 kgf), esto pudo ser causado por lo enlaces que forma el criogel con el agua de la carne provocando mayor fuerza en la unión de las proteínas, por lo que se necesitaba de mas fuerza para romper esos enlaces, sin embargo no se encontraron diferencias entre si en el tiempo para empezar el corte en la carne, por lo que se puede decir que el uso del criogel beneficia al mantenimiento de la terneza de la carne, aumentando la fuerza necesaria para cortar la carne por la interacción del criogel con la carne.

## Conclusiones

El uso de la técnica de fotografía digital resultó, una alternativa útil para la medición del color de la superficie de la carne, aunque para algunos casos en los tratamientos de carne mostraron diferencias significativas con el uso del colorímetro, estos fueron provocados por la humedad en la superficie de la carne, ya que esta reflejaba la luz y tenía espacios más blancos lo que provocaba que la diferencia aumentara, de igual forma la técnica tiene como desventaja que la amplitud de la luz hacia la carne es mayor en comparación con el colorímetro que sólo toma la medida de un espacio delimitado, por lo que causa que exista diferencia entre las técnicas, pero corrigiendo la humedad en la superficie los resultados eran muy cercanos a los del colorímetro.

La aplicación de criogel como protector en la congelación de la carne, resultó efectivo para el nivel D de criogel, ya que al cambiar el nivel de criogel, éste reorganizaba su estructura, lo que provocaba un aumento en la interacción con el agua libre de la carne, controlando la formación libre de los cristales y evitando el daño provocado por esto; los cambios que existen en los parámetros de perfil de color durante los tratamientos, fueron reflejados en la carne descongelada, por efecto en las proteínas y en la pérdida de humedad causado por la congelación, así como por la cavitación gaseosa en el ultrasonido, lo que provocaba una ruptura en su estructura y tenía mayor susceptibilidad en la desnaturalización de las proteínas, sin embargo, como se mencionó el nivel D fue el que menor cambio tuvo con respecto a la carne fresca, reflejado en el valor de  $\Delta E^*$ , siendo inferior para los diferentes tratamientos con respecto a los demás niveles de criogel.

Para el espectro de mioglobina no hubo diferencias significativas entre la tendencia de la curva espectral para ningún nivel con respecto a la carne fresca y la carne descongelada sin criogel, pero si tuvo diferencias en su valor de absorbancia, el nivel D de igual forma es el que no presenta diferencias significativas con la carne fresca en cuanto a su absorbancia, la carne presentaba en un inicio metamioglobina, por lo que se puede decir que el criogel no tiene efecto en la forma química de la

mioglobina, esta cambia por la oxigenación de la carne por el contacto con el aire y por la reducción de esta provocada por envejecimiento o causada por el efecto de oxidación en la congelación.

Finalmente para la fuerza de corte, se presentó una disminución en la carne descongelada sin criogel provocado por el ablandamiento en su estructura por la congelación, y para la carne con el nivel D de criogel, presentó un aumento en la fuerza de corte en comparación con la carne fresca, esto debido a los enlaces formados por el criogel con el agua lo que provocó mayor unión en los componentes de la carne, necesitando mayor esfuerzo para su corte, con lo que podemos concluir que el uso de criogel en su nivel D de congelación descongelación es benéfico para mantener los atributos de calidad de la carne deseados por el consumidor por su capacidad de formar enlaces con el agua libre de la carne, evitando el daño causado por la congelación y la pérdida de sus atributos sensoriales en los exudados.

## Referencias bibliográficas

- **Abdallah, M. B., Marchello, J. A., & Ahmad, H. A.,** (1999). Effect of freezing and microbial growth on myoglobin derivatives of beef. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 47, 4093–4099.
- **Agoulon, A.,** (2012). Impacto de los parámetros de congelación en las características de los alimentos. *Carburos Metálicos Grupo Air Products*.
- **Albertí, P.** (2001). Medición del color. *Metodología para el Estudio de la Calidad de la Canal y de la Carne de Rumiantes*. 157-166.
- **AMSA,** (2012). Meat Color Measurement Guideline. *American Meat Science Association*. 1-12.
- **Andújar, G., Pérez, D. & Venegas, O.,** (2003). Química y bioquímica de la carne y productos cárnicos. *Instituto de investigaciones para la industria alimenticia. Editorial Universitaria Cuba*.
- **Añón, M. C., & Cavelo, A.,** (1980). Freezing rate effects on the drip loss of frozen beef. *Meat Science*. 4, 1–14
- **Belitz, H. D., Grosch, W. & Schieberle, P.,** (2009). Meat. *Food Chemistry*. Springer Fourth Edition.
- **Biliaderis, C. G.,** (1991). The structure and interactions of starch with food constituents. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. 69, 60-78.
- **Braun, R. & Pattacini, S. H.,** (2011). Calidad de carne porcina. evaluación de propiedades tecnológicas de la res en cerdos alimentados con sorgo termoprocesado en la región semiárida pampeana. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 22, 5-12.
- **Brosnan, T., & Sun, D. W.,** (2002). Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 23, 193–213.
- **Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., Ball S.,** (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 11, 85–112.

- **Calvelo, R. J.**, (1981). Recent studies on meat freezing. *In R. Lawrie Ed., Developments in meat science London: Elsevier Applied Science Publishers.*
- **Chemat F., Zill-e-Huma, Khan M. K.**, (2011). Applications of ultrasound in food technology. Processing, preservation and extraction. *Ultrasonic Sonochemistry.* 18, 813-835.
- **Cousidine, D. M.**, (1982). Foods and Food Production Encyclopedia. *John Wiley Inc., New York*, p. 142.
- **Díaz, M.**, (2001) Características de la canal y de la carne de corderos lechales manchegos. Correlaciones y ecuaciones de predicción. *Memoria para optar al grado de Doctor. Universidad Complutense de Madrid. España*
- **Downey, G.**, (2003). Effects of cryoprotectant mixtures on physical properties of frozen and thawed purees cooked potatoes: some introductory studies. *International Journal of Food Science and Technology.* 38, 857-868.
- **Faustman, C. & Cassens, R. G.**, (1990). The biochemical basis for discoloration in fresh meat: a review. *Muscle Foods.*12, 217-243.
- **Fellows, P.**, (2000). Freezing Food processing technology, principles and practice. Second edition. *Woodhead Publishing Limited.* 418-440
- **Fernández-López, J., Pérez-Alvarez, J.A., Sayas-Barberá, E. & Aranda-Catalá, V.**, (2000). Characterization of the different states of myoglobin in pork using color parameters and reflectance ratios. *Journal of Muscle Foods.* 11, 157-167.
- **Floros, J., & Liang, H.**, (1994). Acoustically assisted diffusion through membranes and biomaterials. *Food Technology.* 6, 11-21.
- **French, D.**, (1984). Organization of starch granules. *In: Starch: Chemistry and Technology. Whistler, R.L., BeMiller, J. N. and Paschall, E. F. (eds.). Academic Press., New York.* 183-247.
- **García, R. A. P.**, (2011). Obtención y caracterización de almidones modificados y su aplicación como agentes encapsulantes del bioinsecticida *Bacillus thuringiensis.* *Facultad de Química Universidad Autónoma de Querétaro.* 29-35.
- **Genot, C.** (2003). "Congelación y calidad de la carne". *Zaragoza: Acribia.*

- **Giannouli P. & Morris E. R.**, (2003). Cryogelation of xanthan. *Food Technology*. 17, 495-501
- **Girolami, A., Napolitano, F., Faraone, D. & Braghieri, A.**, (2012). Medición del color de la carne utilizando un sistema de visión por ordenador. *Meat Science*. 93, 111-118.
- **Gonzalez-Sanguinetti, S., Añón, M. C. & Cavelo, A.**, (1985). Effect of thawing rate on the exudate production of frozen beef. *Journal of Food Science*. 697–700.
- **Gun'ko, V. M., Savina, I. N. & Mikhalovsky, S. V.**, (2013). Cryogels: Morphological, structural and adsorption characterisation. *Advances in Colloid and Interface Science*. 187, 1-46.
- **Haydock, D., & Yeomans, J.**, (2003). Acoustic enhancement of diffusion in a porous material. *Ultrasonics*. 531-538.
- **Heredia, F. J.**, (2009). El color: fundamentos y Aplicaciones. *UNS, Ed. Bahía Blanca*.
- **Hleap, J. I. & Velasco, V. A.**, (2010). Análisis de las propiedades de textura durante el almacenamiento de salchichas elaboradas a partir de tilapia roja (*oreochromis sp.*). *Universidad Nacional de Colombia*. 46-56.
- **Inglett, G. E.**, (1970). Corn in perspective. *Corn: culture, processing, products*. *The Avi Publishing Company, Inc., U. S. A.* 1-5.
- **ISO 12647-2** Graphic technology. Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints.
- **Jayasooriya, S. D.**, (2004). Efecto del ultrasonido de potencia en las propiedades de la carne. *International Journal of Food Properties*. 7, 301-319.
- **Johansson, G.**, (1989). Relationships between different colour parameters from reflectance measurements of bovine muscles. *Proc. 35th International Congress of Meat Science and Technology*.
- **Kiani, H. & Sun, D. W.** (2011). Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review. *Trends in Food Science and Technology*. 22(8), 407-426.

- **Kulp, K.**, (1973). Characteristics of small-granule starch of flour wheat. *Cereal Chemistry*. 15, 666–679.
- **Lagerstedt, A., Enfalt, L., Johansson, L., & Lundstrom, K.** (2008). Effect of freezing on sensory quality, shear force and water loss in beef M. Longissimus dorsi. *Meat Science*. 80, 457–461.
- **Lawless, H. T., & Heymann, H.**, (1998). Sensory evaluation of food: principles and practices. *New York: Chapman & Hall*. 21, 406–429.
- **Lawrie, R. A.**, (2006). Meat Science. *Woodhead Publishing in Food Science, Technology and Nutrition*. 7° Edición.
- **Leighton, T.**, (2007). What is ultrasound? *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 93, 3-83.
- **Leygonie, C., Britz, T. J. & Hoffman, L. C.**, (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*. 91, 93-98.
- **Li, Bing; Da-Wen Sun.** (2002). “Novel methods for rapid freezing and thawing of foods- a review”. *Journal of Food Engineering*. 54,175-182.
- **Lindahl, G., Lundström, K. & Tornberg, E.**, (2001). Contribution of pigment content myoglobin forms and internal reflectance to the colour of pork loin and ham from pure breed pigs. *Meat Science*. 59, 141-151.
- **Liu, Q.**, (2005). Understanding starches and their role in foods. In “*Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications*”. Taylor and Francis Group LLC, Boca raton, Florida. 89, 311-349.
- **Livingston, D. J., & Brown, W. D.**, (1981). The chemistry of myoglobin and its reactions. *Food Technology*. 35, 238–252.
- **Lozinsky, V. I.**, (2012). Cryogels on the basis of natural and synthetic polymers: preparation, properties and applications. *Russian chemical Reviews*. 6, 489-511.
- **Lozinsky, V. I., Damshkaln, L. G. & Kurochkin, I. I.**, (2008). Study of cryostructuring of polymer systems: Physicochemical properties and morphology of poly(vinyl alcohol) cryogels formed by multiple freezing-thawing. *Colloid Journal*. 189-198.



- **Lozinsky, V. I., Plieva, F. M., Savina, I. N., Jungvid, H. & Matisson B.,** (2003). Polymeric cryogels as promising materials of biotechnological interest. *Trends in Biotechnology*. 445-451.
- **MacDonald, G. A. & Lanier, T. C.,** (1997). Cryoprotectants for improving frozen-food quality. *Quality in Frozen Food*. 197-199.
- **Martin, R. G.,** (1997). "Quality of Frozen Food". *British Library Springer-Science*. 12,197-198.
- **Mason, T. J.,** (1998). Power ultrasound in food processing. *Ultrasound in Food Processing*.
- **Mohan, A.,** (2009). Myoglobin redox form stabilization: role of metabolic intermediates and nir detection. *An abstract of a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of philosophy. Food Science. Kansas State University. Manhattan, Kansas.*
- **Moreno, B.,** (2006). Higiene e inspección de carnes-I. *España, Editorial Acribia*.
- **Nicoletti, V. R.,** (2012). Biopolymer Engineering in Food Processing. *E.U: CRC Press*.
- Norma Mexicana **NMX-F-544-1992**. Alimentos. Método de prueba para la determinación de humedad en productos cárnicos.
- Norma Oficial Mexicana **NOM-194-SSA1-2004**, Productos y servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos.
- **Orrego, A. C. E.,** (2008). Congelación y liofilización de alimentos. *Universidad Nacional de Colombia*.
- **Oyagüe, M.,** (2007). Estabilidad del color de la carne fresca. *Nacameh*. 1, 67-74.
- **Petzold, G. & Aguilera, J. M.** (2009). Ice morphology: Fundamentals and technological applications in foods. *Food Biophysics*. 4(4), 378-396.

- **Prieto, B. N.**, (2006). Aplicación de la tecnología NIRS para estimar parámetros indicativos de la calidad de la carne de vacuno. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas Estación Agrícola Experimental*. 21-69.
- **Purslow, P.**, (2017). New aspects of meat quality from genes to ethics. *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*.
- **Risvik, E.**, (1994). Sensory properties and preferences. *Meat Science*. 36, 67–77.
- **Robles L. E., & Ochoa L. A.**, (2012). Ultrasonido y su aplicación en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 13, 109-122
- **Sahiner, N., Sagbas, S., Sahiner, M. & Silan, C.**, (2016). P(TA) macro-, micro-nanoparticle-embedded super porous p(HEMA) cryogels as wound dressing material. *Materials Science and Engineering C*. 70, 317-326.
- **Sánchez, C. F.**, (2001). Procedimientos y condiciones adecuadas para la determinación de parámetros texturales en queso tipo panela, mayonesa y margarina comerciales por medio de texturometro y penetrómetro universal. *Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Universidad Nacional Autónoma de México*.
- **Sensing, K.**, (2007). Precise color communication. *Color control from preception to instrumentation*.
- **Singh, R. P. & Heldman, D. R.**, (2009). Introduction to food engineering. *Science Technology Fourth Edition*. 93, 501-515.
- **Smith, G. C.; Carpenter, Z. L.; Dutson, T. R. & Hostetler, R. L.** (1978). "Singular and combined methods for increasing tenderness of beef". *Proceedings of the European Meeting of Meat Research Workers*. 44, 425-432.
- **Szczesniak, A. S.**, (1963). Objective measurements of food texture. *Journal of Food Science*. 410-420.
- **Válková, V, Saláková, A, Buchtová, H & Tremlová, B.**, (2007). Chemical, instrumental and sensory characteristics of cooked pork ham. *Meat Science*. 77, 608-615.

- **Van de Voort, F. R. & Ismail, A. A.,** (1991). Proximate analysis of foods by mid-FTIR spectroscopy. *Trends in food science & technology*.
- **Van Laack, R., Berry, B. & Solomon, M.,** (1996). Variations in internal color of cooked beef patties. *Journal Food Science*. 44, 410-414.
- **Vera, R. M., Rivera, M. E. & Arias P. M.,** (2016). Impacto del ultrasonido sobre el color y textura en carne fresca de cerdo. *Agronomía Colombiana* 34. 1, 1062-1065.
- **Villamiel, M. & de Jong, P.,** (2000). Inactivation of *Pseudomonas fluorescens* and *Streptococcus thermophilus* in trypticase soy broth and total bacteria in milk by continuous flow ultrasonic treatment and conventional heating. *Food Engineering*. 45, 171-175.
- **Wurzburg, O. B.,** (1986). Modified starches: Properties and uses. *CRC Press, Boca Raton, Florida*.
- **Yam, K. L. & Papadakis, S. E.,** (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*. 61, 137-142.
- **Zhang, H., Zhang, F. & Wu, J.,** (2013). Physically crosslinked hydrogels from polysaccharides prepared by freeze-thaw technique. *Reactive and Functional Polymers*. 73, 923-928.