



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Efecto de la adición de criogel con ultrasonido sobre  
la fusión de cristales de hielo en carne de cerdo**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA

**MAYRA JANNETH CANO ROMÁN**

ASESORA

**DRA. ROSALÍA MELÉNDEZ PÉREZ**

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO, 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

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

**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**



**ATN: DRA. MARIA DEL CARMEN VALDERAMA BRAVO**  
**Jefa del Departamento de Titulación**  
**de la FES Cuautilán.**

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 adición de criogel con ultrasonido sobre la fusión de cristales de hielo en carne de cerdo**

Que presenta la pasante: **Mayra Janneth Cano Román**  
Con número de cuenta: **418071032** para obtener el título de: **Ingeniera en Alimentos.**

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

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Cuautilán Izcalli, Méx. a 22 de Noviembre de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

|                      | <b>NOMBRE</b>                    | <b>FIRMA</b> |
|----------------------|----------------------------------|--------------|
| <b>PRESIDENTE</b>    | Dra. Rosalía Meléndez Pérez      |              |
| <b>VOCAL</b>         | I.A. Miriam Alvarez Velasco      |              |
| <b>SECRETARIO</b>    | I.A. Miriam Edith Fuentes Romero |              |
| <b>1er. SUPLENTE</b> | I.Q.I. Ada Josefa Meza Meza      |              |
| <b>2do. SUPLENTE</b> | Dr. Jonathan Coria Hernández     |              |

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

MCVB/javg

El presente trabajo de tesis fue resultado del 0912-TMIA opción Ingeniería de Procesos de Separación por Transferencia de Masa y, su desarrollo se llevó a cabo en el Laboratorio 13 “Análisis térmico y estructural de alimentos y materiales” de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria de la FES Cuautitlán el cual recibió apoyo de los proyectos:

- UNAM-DGAPA **PAPIIT IT200622** “Evaluación del comportamiento de la conductividad térmica y el análisis de imagen en la formación-fusión de escarcha en carne congelada con la aplicación de criogel con ultrasonido como inhibidor de crecimiento”.
- UNAM-FESC **PIAPI 2006** “Análisis térmico de materiales y alimentos y su relación con los procesos de transferencia de calor y masa”.
- UNAM-FESC **CI 2235** “Análisis térmico y estructural de la escarcha en alimentos y materiales congelados con la aplicación de criogel con ultrasonido”.

## Agradecimientos

---

Al concluir esta etapa de mi vida quiero agradecer profundamente, a quienes me acompañaron en este sueño, siendo siempre inspiración, apoyo y fortaleza.

A la **Dra. Rosalía Meléndez** y al **Dr. Jonathan Coria**, no sólo por ser mis asesores y apoyo académico para lograr este proyecto, si no también por cada plática, risa, lágrima, abrazo y consejo durante esta etapa. Al Dr. José Luis Arjona por cada consejo y ser parte fundamental para que esta tesis haya sido posible. Mi mas grande admiración y respeto para ustedes. Gracias por creer y confiar en mi.

A mis padres **Rosa y Juan**, a quienes quiero con todo mi ser, que han sido siempre el motor que me impulsa en cada uno de mis sueños aunque parezcan imposibles, quienes en todo momento han acompañando mi camino demostrandome su amor incondicional, por ser siempre mi lugar seguro en este mundo. Orgullosa de que la vida los haya puesto como mi mami y papá oso. Gracias por ser mi todo.

A mis hermanos **Daniela y Juan Carlos**, con quienes no hace falta gritarlo al mundo para saber el gran amor y admiración que nos tenemos, quienes fueron los primeros que me enseñaron sobre responsabilidad. Mi men y mi menita, los amo con locura desde el primer día que llegaron a mi vida. Gracias por darme lo mejor que me pudo pasar, hacerme hermana.

A mi mejor amiga y comadrита **Mayra**, por esos 15 años y contando de ser mi compañera de aventuras y postres. A mi compadrito **Rodrigo** por todas las risas y consejos. Gracias por hacerme parte de su familia, por mis pequeños hermosos **Emiliano y Leonardo**, y por ser mi refugio cuando mas lo necesito.

A mi **Ale** por todos estos años y camino que compartimos, por acercarte a mi sin pensarlo aquel día en Campo 4, por ser mi compañera de estudio y de equipo en todas las clases, y desvelarte conmigo no sólo por un trabajo si no para ser mi soporte. A **Mariely** por ser mi amiga desde el primer día en la FES-C, por tu confianza, apoyo, todas las platicas y estar presente en cada uno de los momentos de esta última etapa. Las admiro, respeto y adoro muchísimo. Gracias por crecer conmigo.

A las profesoras **Miriam Alvarez, Edith Fuentes y Ada Meza**, por su tiempo, cada consejo y comentario para enriquecer y lograr que esta tesis concluyera.

Gracias a la universidad por haberme permitido formarme en ella, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, directa o indirectamente, permitiendo que el día de hoy pueda decir que soy orgullosamente **UNAM**.

# Índice General

---

---

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Índice de figuras .....                          | 7           |
| Índice de tablas .....                           | 8           |
| Resumen .....                                    | 9           |
| Introducción .....                               | 10          |
| Capítulo 1. Antecedentes .....                   | 11          |
| 1.1 Congelación .....                            | 11          |
| 1.2 Descongelación .....                         | 14          |
| 1.3 Ultrasonido .....                            | 16          |
| 1.4 Crioprotector .....                          | 19          |
| 1.5 Carne .....                                  | 22          |
| 1.5.1. Estructura .....                          | 22          |
| 1.5.2 Composición .....                          | 24          |
| 1.6 Parámetros de calidad en la carne .....      | 26          |
| 1.6.1 Potencial de hidrogeno (pH) .....          | 26          |
| 1.6.2 Capacidad de Retención de Agua (CRA) ..... | 28          |
| 1.6.3 Perfil de color .....                      | 30          |
| 1.6.4 Fuerza de corte .....                      | 31          |
| Capítulo 2. Metodología experimental .....       | 33          |
| 2.1 Diagrama experimental .....                  | 33          |
| 2.2 Descripción del diagrama experimental .....  | 34          |
| 2.2.1 Objetivos e hipótesis .....                | 34          |
| Objetivo general .....                           | 34          |
| Objetivos particulares .....                     | 34          |
| Objetivo particular 1 .....                      | 34          |
| Variables .....                                  | 34          |
| Hipótesis .....                                  | 34          |
| Objetivo particular 2 .....                      | 35          |

|  |    |
|--|----|
| <b>Variables</b> .....   | 35 |
| <b>Hipótesis</b> .....   | 35 |
| <b>2.2.2 Actividades preliminares</b> .....                          | 35 |
| <b>Control de la materia prima</b> .....                             | 35 |
| <b>Preparación, formación y difusión del criogel</b> .....           | 36 |
| <b>Congelación con y sin criogel</b> .....                           | 36 |
| <b>2.2.3 Objetivo particular 1</b> .....                             | 36 |
| <b>Descongelación por inmersión y asistida por ultrasonido</b> ..... | 36 |
| <b>2.2.4 Objetivo particular 2</b> .....                             | 37 |
| <b>Potencial de hidrógeno (pH)</b> .....                             | 37 |
| <b>Perfil de color</b> .....   | 37 |
| <b>Capacidad de Retención de Agua (CRA)</b> .....                    | 38 |
| <b>Resistencia al corte</b> .....                                    | 38 |
| <b>Análisis estadístico</b> .....                                    | 38 |
| <b>Capítulo 3. Análisis y discusión de resultados</b> .....          | 39 |
| <b>3.1 Selección de condiciones</b> .....                            | 39 |
| <b>3.2 Congelación – descongelación</b> .....                        | 41 |
| <b>3.3 Pruebas de calidad</b> .....                                  | 44 |
| <b>3.3.1 pH</b> .....  | 44 |
| <b>3.3.2 Capacidad de Retención de Agua</b> .....                    | 45 |
| <b>3.3.3 Parámetros de perfil de color</b> .....                     | 47 |
| <b>3.3.4 Fuerza de corte</b> .....                                   | 49 |
| <b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....                          | 51 |
| <b>Referencias</b> .....   | 53 |

## Índice de Figuras

---

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Figura 1.</b> Ejemplo de curva de congelación del solvente puro y de un alimento.....   | 11   |
| <b>Figura 2.</b> Ejemplo de la carne sometida a congelación rápida y lenta. ....   | 13   |
| <b>Figura 3.</b> Curvas típicas de descongelación. ....  | 15   |
| <b>Figura 4.</b> Proceso de cavitación generado por el ultrasonido. ....   | 18   |
| <b>Figura 5.</b> Sistema de baño de ultrasonido (1) y tipo sonda (2) .....   | 19   |
| <b>Figura 6.</b> Estructura de la amilosa (a) y amilopectina (b). ....   | 21   |
| <b>Figura 7.</b> Estados de formación de un criogel.....   | 21   |
| <b>Figura 8.</b> Organización estructural del músculo. ....  | 23   |
| <b>Figura 9.</b> Diagrama experimental.....  | 33   |
| <b>Figura 10.</b> Historial térmico de descongelación de carne con criogel en ultrasonido. ....                                      | 39   |
| <b>Figura 11.</b> Fuerza de corte ( $kg_f$ ) en las muestras de carne analizadas.....  | 40   |
| <b>Figura 12.</b> Perfil térmico de congelación de carne fresca y con criogel, y descongelación en inmersión y ultrasonido.....      | 42   |
| <b>Figura 13.</b> Historial térmico de descongelación de carne fresca y con criogel, por los métodos de inmersión y ultrasonido..... | 43   |
| <b>Figura 14.</b> Gráfica de caja de pH en los diferentes tratamientos. ....   | 45   |
| <b>Figura 15.</b> Gráfica de caja de CRA en los diferentes tratamientos. ....  | 47   |
| <b>Figura 16.</b> Gráfica de caja de la coordenada $L^*$ en los diferentes tratamientos. ....  | 48   |
| <b>Figura 17.</b> Fuerza de corte ( $kg_f$ ) en las muestras de carne. ....  | 49   |
| <b>Figura 18.</b> Gráfica de caja de la resistencia al corte ( $kg_f$ ) en los diferentes tratamientos.....                          | 50   |

## Índice de Tablas

---

---

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Tabla 1.</b> Composición química de la carne de cerdo.....                                    | 24          |
| <b>Tabla 2.</b> Métodos para determinar la pH en alimentos .....                                 | 27          |
| <b>Tabla 3.</b> Métodos para determinar la CRA de los alimentos .....                            | 29          |
| <b>Tabla 4.</b> Valores de PIC en carne fresca y con criogel-US comparado con referencias.....   | 41          |
| <b>Tabla 5.</b> Valores de PIF y velocidad de descongelación de los diferentes tratamientos..... | 43          |
| <b>Tabla 6.</b> Valores promedio de pH en los diferentes tratamientos. ....                      | 44          |
| <b>Tabla 7.</b> Valores promedio de CRA en los diferentes tratamientos. ....                     | 46          |
| <b>Tabla 8.</b> Valores promedio de parámetros de color de las muestras de carne.....            | 47          |
| <b>Tabla 9.</b> Valores promedio de parámetros de fuerza de corte de las muestras de carne.....  | 50          |

## Resumen

---

La descongelación es el proceso donde se lleva un alimento congelado a una temperatura en la que no hay hielo residual (generalmente superior a 0 °C). En este tratamiento se pueden hacer uso de técnicas novedosas que beneficiarán la transformación, como son el ultrasonido y los criogel. El ultrasonido es una tecnología emergente que produce ondas de sonido y que ha demostrado que mejora la descongelación, logrando disminuir el tiempo y favoreciendo la calidad final del alimento. El criogel es un sistema de biopolímeros utilizados como crioprotectores y son conocidos como "estabilizadores", debido a que inducen a la reorganización estructural del producto, dándole mayor solidez. En este estudio se utilizó músculo *Longissimus thoracis* de cerdo, el cual fue congelado en nitrógeno con y sin criogel de almidón waxy, y descongelado en condiciones controladas con inmersión y ultrasonido, donde se evaluaron algunos parámetros térmicos (Punto o zona inicial y velocidad de fusión) y de calidad (pH, capacidad de retención de agua (CRA), parámetros de perfil de color y fuerza de corte). Demostrando que la adición del criogel modifica la zona inicial de fusión, y que la descongelación asistida por ultrasonido aumenta la velocidad de fusión. Así como que ambos factores influyen en los parámetros de calidad, sin embargo, el efecto principal sobre el pH es el uso de criogel, caso contrario en la CRA, parámetros de color y fuerza de corte, donde, el efecto principal es el método de descongelación. A partir de estos resultados, se concluye que tanto el criogel de almidón waxy y la descongelación con ultrasonido tiene potencial como tecnología aplicada en el procesamiento de alimentos

## Introducción

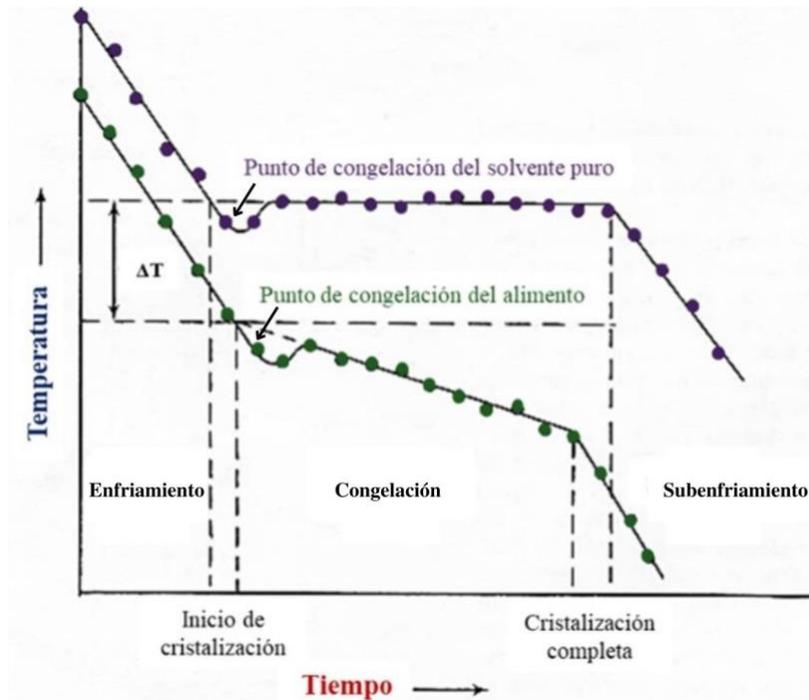
---

La industria alimentaria busca que los productos tengan características similares a un alimento fresco y esto se logra minimizando los efectos en atributos de calidad. Además, la industria cárnica se ha basado mayormente en el uso del producto descongelado para el procesamiento. Esto hace que se busque obtener propiedades tecnológicas cercanas a la carne refrigerada, lo que se logra minimizando todos los cambios experimentados durante la descongelación. En la literatura es bien conocido que la congelación rápida ofrece alguna ventaja de calidad, ya que influye en el tamaño, la ubicación (intra- o extracelular) y la morfología de los cristales de hielo. Sin embargo, la descongelación ha recibido una menor atención científica que el enfriamiento o la congelación. Se tiene información que indica que la velocidad de descongelación influye en la pérdida de agua del producto, cambiando su composición y alterando principalmente las interacciones agua-proteína, sin embargo, los estudios (Kim et al., 2015 y Pérez et al., 2005) han sido principalmente en el contexto de descongelación doméstica y no en las prácticas comerciales. Otro factor para destacar es el extenso tiempo requerido para descongelar los alimentos de manera convencional y que puede aumentar los costos de energía o requerir grandes cantidades de agua. Con esto, en el presente trabajo se busca comparar un método de descongelación tradicional como lo es la descongelación por inmersión en agua y nuevas tecnologías como la asistencia de ultrasonido, que ha demostrado facilitar la transferencia de calor durante la descongelación, así como el efecto de la adición de criogel de almidón waxy, que ha mostrado efectividad en la reducción del tamaño de los cristales de hielo durante la congelación, todo esto en el proceso de congelación-descongelación, evaluando los efectos en algunos parámetros de calidad en la carne de cerdo.

# Capítulo 1. Antecedentes

## 1.1 Congelación

Para poder estudiar la descongelación, primero se pasa por un tratamiento de congelación, por lo que es importante tener los conocimientos teóricos para entender el proceso. La congelación se puede definir como la cristalización del agua contenida en los alimentos formando hielo. Se considera un método de conservación a largo plazo ya que existe un descenso significativo de la actividad del agua, lo que limita la actividad enzimática y microbiana. Sin embargo, puede afectar algunas propiedades de los alimentos, lo que hace necesario conocer como sucede la transformación de agua en hielo durante el proceso, esto se puede explicar con las curvas de congelación. En la Figura 1, se observa la comparación del proceso de congelación del solvente puro (agua) y el caso de un alimento. Las fases que podemos encontrar son: enfriamiento, nucleación, congelación y subenfriamiento (Pham, 2008).



**Figura 1.** Ejemplo de curva de congelación del solvente puro y de un alimento.

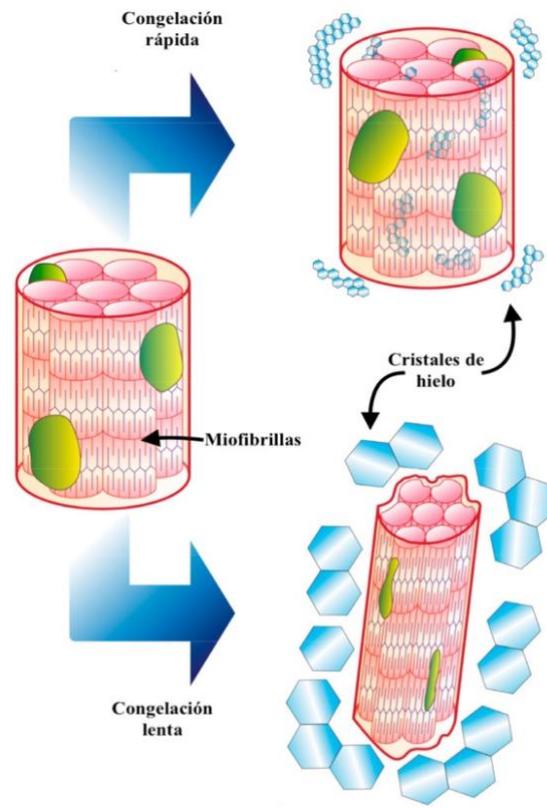
*Fuente: Walstra (2002).*

Al hablar de agua pura, en la etapa de enfriamiento, la temperatura es mayor al punto de congelación, por lo que no existirá formación de núcleos de cristales de hielo y habrá una eliminación de calor sensible, que se observa con el decremento lineal de la temperatura con respecto al tiempo. Al llegar al punto de congelación (0 °C), el agua no se convierte en hielo inmediatamente, sino que es necesario un sobre-enfriamiento que representa la diferencia entre la temperatura real del agua y la temperatura del equilibrio sólido-líquido. La nucleación es la zona de inicio de cristalización, que indica el comienzo de la congelación e involucra la presencia o formación de pequeños núcleos que son los centros de los cristales que se forman y se conoce como punto inicial de congelación (PIC). En la etapa de congelación se lleva a cabo la formación y crecimiento de cristales, e implica la remoción del calor necesario para llevar a cabo el cambio de fase de agua a hielo (calor latente). Finalmente, en la etapa de subenfriamiento o atemperado, el calor sensible del agua se elimina y el hielo se enfría a la temperatura del medio (Walstra, 2002).

En los alimentos, la presencia de solutos provoca que existan diferencias en la curva, tales como: la temperatura de congelación y subenfriamiento son menores a las del agua pura, además de que la formación de cristales de hielo no es a temperatura constante. Lo anterior se observa cuando la solución comienza a cristalizar, y después llega a su temperatura de congelación, el PIC disminuye conforme se forma hielo, debido a la concentración del soluto en el agua no-congelada remanente. Esto ocurre hasta que la solución llega a la temperatura de subenfriamiento (Walstra, 2002).

Algunos métodos que se conocen son: congelación con aire y por contacto. El primero se dice que es el más utilizado en el procesamiento de carne, ya que es económico e higiénico, sin embargo, tiene como desventaja que la velocidad de transferencia de calor del producto es baja. El método por contacto se basa en la transferencia de calor por contacto directo entre productos y superficies metálicas o por inmersión directa en un líquido refrigerado. Un congelador de inmersión se compone de un tanque con un líquido criogénico enfriado, que puede ser una solución de sal, nitrógeno o alcohol no tóxico en agua, y un medio para transportar la carne envuelta a través del tanque. La congelación por contacto ofrece varias ventajas, por ejemplo, una mayor velocidad de transferencia de calor y un importante ahorro de energía. Sin embargo, las desventajas son la necesidad de productos de forma regular con grandes superficies planas con sistemas de placa, y la necesidad de lavar el líquido de inmersión (Evans, 2008).

Un aspecto importante que se debe considerar en la congelación es la formación de cristales de hielo, ya que a mayor tamaño se provocará un mayor daño estructural, lo que afectará la calidad del alimento causando mayor ruptura y separación de las células, a diferencia de los de tamaño pequeño. Esta formación se verá influenciada por la velocidad de congelación, lo que se puede representar en la Figura 2, donde se observa la estructura celular con espacios compactos compuestos por soluciones acuosas y espacios extracelulares que también contienen soluciones acuosas, formadas en su mayoría por agua.



**Figura 2.** Ejemplo de la carne sometida a congelación rápida y lenta.

*Fuente: Dang et al. (2021).*

La congelación de la carne puede ser del agua existente fuera y dentro de las células, dependiendo de la velocidad de congelación. Si la velocidad es baja, se congela preferentemente el agua que está fuera de las células, es decir el agua libre o inmobilizada, lo que genera un desequilibrio en las concentraciones, y el agua ligada migra permitiendo el crecimiento de los cristales de hielo. Esto

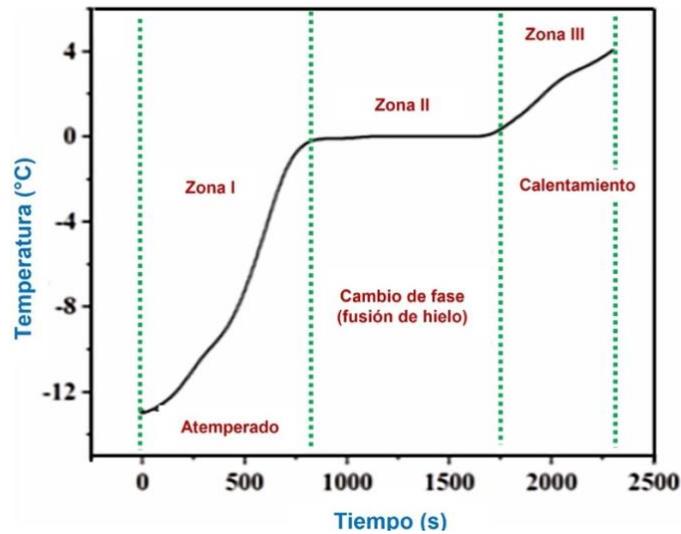
da como resultado un alimento congelado que posee pocos y grandes cristales de hielo en el espacio. Aunado a esto, cuando se produce una descongelación lenta, se funden los cristales de hielo dañando la estructura. Si la congelación es rápida, los diferentes tipos de agua tenderán a congelarse preferentemente en el lugar que ocupaba, es decir no migrarán y los cristales de hielo serán de menor tamaño. No se debe olvidar que independientemente de si la congelación es rápida o lenta, siempre se produce daño mecánico en los tejidos debido a que el agua cuando se congela aumenta su volumen en aproximadamente un 10%, pero el menor daño se producirá con cristales de tamaño pequeño (De Michelis, 2015).

## **1.2 Descongelación**

Después de revisar el proceso de congelación, se debe hablar de descongelación, la cual es el proceso donde se lleva un alimento congelado a una temperatura en la que no hay hielo residual (generalmente superior a 0 °C). A menudo se considera que simplemente es la inversión de la congelación, sin embargo, hay importantes diferencias que deben considerarse. Una de las principales es que, dado que la difusión y la conductividad térmica del hielo son mayores que las del agua, por lo general, para la misma diferencia de temperatura, toma más tiempo descongelarse, en un método de refrigeración, que congelarse (Kim et al., 2015).

Otra diferencia ocurre por el daño estructural del alimento, debido a que puede existir una pérdida de agua que se mantiene en la superficie. Con lo anterior, se dice que lo más conveniente es cocinar el alimento sin previa descongelación, pero el problema llega cuando el alimento no puede tener un proceso de cocción sin ser descongelado, como es el caso de la carne. Es aquí donde se recomienda descongelar a la más alta velocidad posible, con gradientes térmicos elevados o con métodos que mejoren la velocidad de transferencia de calor, evitando siempre la cocción superficial, lo que disminuirá el daño a las propiedades de calidad del producto (James y James, 2010).

El proceso de descongelación se puede representar por medio de una curva como se muestra en la Figura 3, esta consta de 3 etapas: el atemperado o etapa endotérmica, descongelación o etapa de cambio de fase y, calentamiento al punto de temperatura final.



**Figura 3.** Curvas típicas de descongelación.

*Fuente: Zonglin et al. (2021).*

La mayoría de los sistemas de descongelación suministran calor a la superficie y luego dependen de la conducción para transferir este al centro del alimento. Algunos usan radiación electromagnética para generar calor dentro de los alimentos, como el horno de microondas o infrarrojo. Al seleccionar un sistema de descongelación, se debe lograr un equilibrio entre el tiempo de descongelación, la calidad del alimento y los problemas de procesamiento como la eliminación de efluentes. De estos factores, el tiempo de descongelación es el criterio principal que gobierna la selección del sistema. El tiempo de descongelación depende de factores relacionados con el producto y las condiciones ambientales, e incluyen: dimensiones y forma del alimento, en particular el espesor, cambio de entalpía, conductividad térmica del producto, temperaturas inicial y final, coeficiente de transferencia de calor superficial y temperatura del medio de descongelación (James y James, 2010).

Existen dos métodos básicos de descongelación: térmico y eléctrico. Los métodos térmicos incluyen equipos de descongelación por corriente de aire caliente, por inmersión en agua, por tratamientos de la superficie al vacío con vapor y, dependen de la conducción de calor convencional a través de la superficie. Los métodos eléctricos, por otro lado, incluyen el uso de microondas y ultrasonido, estos emplean la generación de calor dentro del producto. Para la selección del equipo a utilizar se debe considerar los costos y las limitaciones de cada uno.

El método de descongelación por aire se utiliza en la gran mayoría de aplicaciones. El uso de aire en reposo se limita a productos de poco espesor; de lo contrario, los tiempos de descongelación son excesivamente largos. El método de inmersión en medios líquidos permite una transferencia de calor mucho más rápida, especialmente si se bombea o agita. Por tanto, los tiempos de descongelación se reducen considerablemente. Una de las limitaciones prácticas es que se requiere la eliminación o el tratamiento de grandes cantidades de agua. La descongelación con vapor se basa en la transferencia de calor latente de condensación sobre las superficies del producto a baja presión y temperatura. El proceso es rápido, pero se restringe a la operación por lotes. En el uso de microondas se hace uso de ondas electromagnéticas (900–3000 MHz) que se dirigen al producto sin el uso de conductores o electrodos. El método es muy rápido, pero la aplicación está limitada por la inestabilidad térmica y la profundidad de penetración. El ultrasonido es un método que facilita la transferencia de calor durante la descongelación por inmersión y éste parece ser más adecuado para producir una descongelación rápida y más estable que las microondas, y que sirve como tecnología emergente, siendo una alternativa a las operaciones convencionales (Kim et al., 2015).

### **1.3 Ultrasonido**

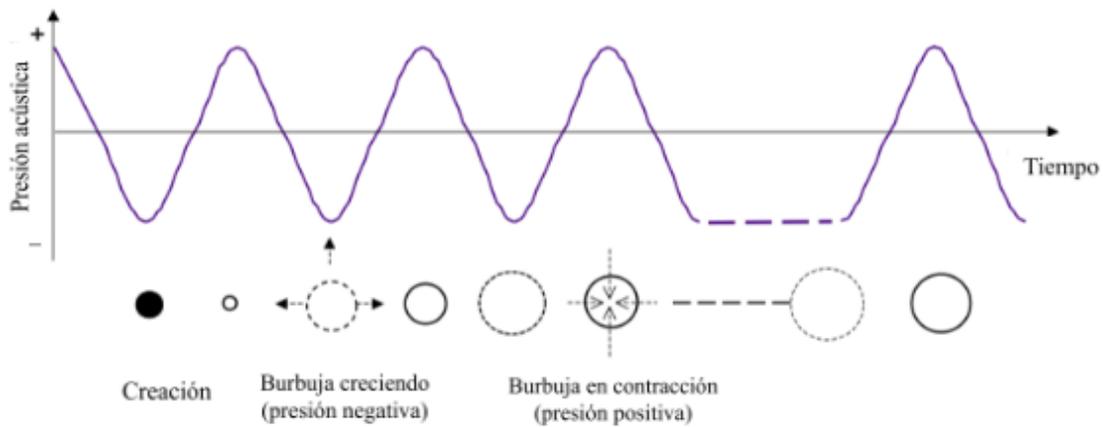
Ultrasonido es el nombre que reciben las ondas de sonido con frecuencias mayores a aquellas que pueden ser detectadas por el oído humano y es una tecnología emergente que puede ser utilizada en diferentes áreas, incluida los alimentos. El ultrasonido maneja ondas con frecuencias entre 16 kHz y 20 MHz, las cuales al ser aplicadas pueden llegar hasta 5 MHz en gases o hasta 500 MHz en líquidos y sólidos. Se puede dividir en tres categorías según las frecuencias utilizadas: ultrasonido de baja frecuencia (2 a 100 kHz), ultrasonido de alta frecuencia (20 kHz a 2 MHz) y ultrasonido de diagnóstico (mayor de 1 MHz). El propósito de la tecnología de ultrasonidos en el procesamiento de alimentos implica ondas de presión con una frecuencia que varía de 20 a 100 kHz (Gou et al., 2021).

Los mecanismos de acción del ultrasonido se clasifican principalmente en térmicos (generación de energía calórica o mecánica), y no térmicos (cavitación, rarefacción, formación de radicales libres, choques micro-mecánicos y fuerza de radiación). La cavitación es inducida en una frecuencia entre

20-100 kHz en medio líquido y se considera el principio básico de la acción del ultrasonido. La rápida generación y destrucción de burbujas de cavitación libera alta energía, lo que conduce a cambios físicos y químicos en las estructuras biológicas. Alterna las regiones de cambio de presión de acumulación de expansión y compresión, lo que conduce al fenómeno de cavitación (Liqing et al., 2020).

Durante el proceso de cavitación acústica, el aumento de la superficie contribuye a la producción de burbujas. Entonces, se presenta la difusión del gas, lo que resulta en la expansión de las burbujas y se provoca una condensación rápida cuando la potencia del ultrasonido es insuficiente para mantener la fase gaseosa dentro de las burbujas. Las ondas de impacto son generadas por las severas colisiones de moléculas adyacentes, que contribuyen a un rápido aumento de temperatura y presión de hasta 5500 K y 100 MPa, respectivamente. Las cavitaciones estables y transitorias son dos categorías de cavitación acústica. La cavitación estable implica burbujas que oscilan regularmente durante varios ciclos acústicos, lo que permite un fenómeno de microcorriente, provocando daños a microorganismos. Durante el proceso de cavitación transitoria, las burbujas producidas experimentan oscilaciones irregulares, que provocan una rápida alternancia de temperatura y presión, lo que lleva a la inactivación de la enzima y la destrucción celular (lisis celular). Las influencias térmicas, mecánicas y químicas son tres efectos causados por el fenómeno de cavitación (Liqing et al., 2020).

La presión negativa durante la rarefacción hará que se formen las burbujas o cavidades en el líquido. Las burbujas crecerán rápidamente y crearán un vacío, haciendo que los gases disueltos en el líquido se difundan en ellas. A medida que pasa la porción de rarefacción de la onda de sonido, la presión negativa se reduce, y cuando se alcanza la presión atmosférica, las burbujas comenzarán a encogerse bajo la tensión superficial. Cuando comienza el ciclo de compresión y mientras dure la presión positiva, el gas que se difundió en las burbujas será expulsado al fluido. La difusión del gas fuera de las burbujas no tendrá lugar hasta después de que las burbujas estén comprimidas. Sin embargo, una vez que la burbuja se comprime, su área de superficie disponible para la difusión disminuye, por lo tanto, la cantidad de gas que se expulsa es menor que la cantidad que se absorbe durante el ciclo de rarefacción. En consecuencia, estas burbujas crecerán más durante cada ciclo de ultrasonido, este fenómeno se puede observar en la Figura 4 (Zheng, 2006).

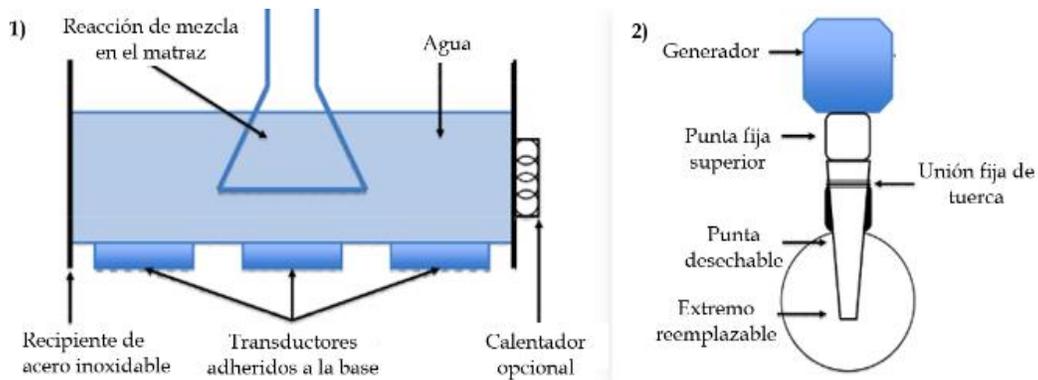


**Figura 4.** Proceso de cavitación generado por el ultrasonido.

*Fuente:* Zheng (2006).

En la congelación, se ha observado que el uso de ultrasonido mejora la velocidad de nucleación, la velocidad de crecimiento de cristales y aumenta los sitios de nucleación, provocando que el congelado convencional sea más rápido. Esto probablemente se deba a la cavitación de las burbujas que actúan como un núcleo para los cristales y su crecimiento. De igual forma se han registrado beneficios en la descongelación de alimentos, ya que logra disminuir el tiempo de esta en comparación al descongelado tradicional conductivo, reduciendo las pérdidas por goteo y mejorando la calidad final. Se ha demostrado que los productos congelados absorben mayor cantidad de energía acústica, lo que provoca la relajación de los cristales de hielo en el alimento (Robles y Ochoa, 2012).

Existen diferentes tipos de sistemas de aplicación de ultrasonidos de acuerdo con el medio a utilizar y los efectos que se quieren producir. Los sistemas de mayor aplicación o uso en el área de alimentos son: baños de ultrasonidos (sonicación indirecta) y sistemas tipo sonda (sonicación directa), los cuales se muestran en la Figura 5 (Delgado, 2011).



**Figura 5.** Sistema de baño de ultrasonido (1) y tipo sonda (2)

*Fuente: Mason et al. (2005).*

Los baños de ultrasonidos son el equipo de sonicación indirecto de mayor uso ya que son más accesibles en cuanto a costo y mantenimiento. Consisten en un tanque con uno o varios transductores, normalmente en la parte inferior. La muestra es sumergida en un medio líquido provocando que la sonicación suceda a través de este. Tienen mayor uso en la limpieza de materiales, pero también han sido utilizados en distintos procesos como en activación e inactivación enzimática, destrucción de microorganismos, mejora de procesos de transferencia de materia, etc. En el caso de los sistemas tipo sonda se pueden aplicar potencias más elevadas que los baños. La forma de la sonda modifica la intensidad de la radiación sonora por lo que esto es una variable que se puede controlar. Una sonda cilíndrica uniforme se limita únicamente a la transmisión de la energía al medio. En cambio, una forma de flecha conlleva un aumento de la amplitud de la vibración. La punta de la sonda se conoce como sonotrodo, esta se introduce en el interior del recipiente que contiene el medio a sonicar y genera las ondas sonoras que se propagan a través del líquido produciendo la cavitación. El material de la sonda debe ser resistente para evitar la erosión de esta (Delgado, 2011).

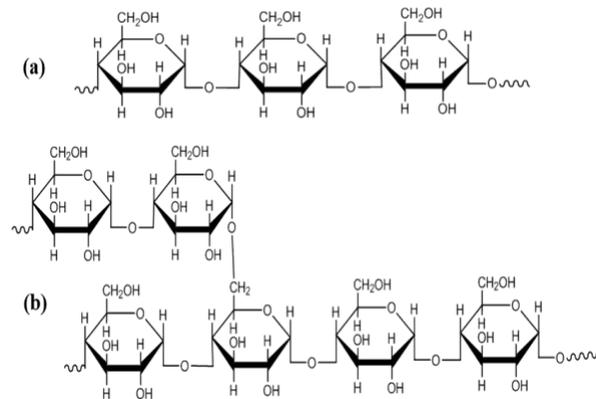
## 1.4 Crioprotector

Además de método de descongelación, otro factor que influye en el proceso es la adición de algún material que modifique la materia prima. La reducción del daño estructural en el alimento depende del grado de expansión del volumen causado por la formación de hielo. Para reducir el daño mecánico, se busca que los cristales de hielo sean lo más pequeños posibles y esto se puede lograr

con un crioprotector. Los biopolímeros (polisacáridos) pueden ser utilizados como crioprotectores y son conocidos como "estabilizadores". Estos no tienen un efecto importante sobre la nucleación y tampoco retardan el crecimiento de los cristales, ya que no afectan la velocidad de difusión. Sin embargo, sí pueden formar un gel, formando una red polimérica elástica lo que reduce el crecimiento de los cristales de hielo. La concentración del polímero puede ser alta, provocando una resistencia mecánica, haciendo que el crecimiento se detenga y los cristales permanezcan pequeños. El efecto varía entre los biopolímeros y aumenta al incrementar la concentración. Los factores involucrados en la crioprotección no están completamente definidos (Coria et al., 2018).

El almidón es una mezcla de dos polímeros, amilosa y amilopectina, que, dependiendo de la proporción de cada polímero, el peso molecular específico y el tamaño de los gránulos, tendrá diferentes propiedades fisicoquímicas, lo que a su vez determinará su aprovechamiento en diversos procesos industriales. La amilosa es un polímero lineal compuesto por moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -(1,4), formando cadenas de poca longitud que se unen por enlaces  $\alpha$ -(1,6) a la cadena central. La amilopectina también está compuesta por unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -(1,4), pero a diferencia de la amilosa, ésta presenta ramificaciones localizadas cada 15 a 25 unidades lineales de glucosa, y de igual forma se unen por enlaces  $\alpha$ -(1,6) a la cadena central. Ambos polímeros no existen de forma libre en la naturaleza sino como agregados semicristalinos, es decir contenidos en los gránulos de almidón, en la Figura 6 se presentan las estructuras de ambos (Martinez, 2007).

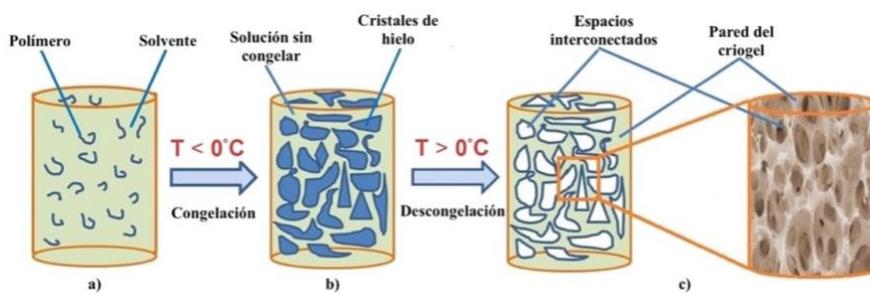
La mayoría de los almidones se componen por 25% de amilosa y 75% de amilopectina, sin embargo, almidones modificados como el waxy o ceroso se componen de 99% de amilopectina. El maíz ceroso (waxy) es un tipo especial de maíz derivado de una mutación ( $wx=waxy$ ). Su nombre deriva por la apariencia cerosa del endospermo en un corte longitudinal del grano (Corn Refiners Association, 2006). Este último, ha mostrado su efectividad en la reducción del tamaño de los cristales de hielo durante la congelación de carne, por lo que el almidón waxy es considerado como un buen crioprotector (Martinez, 2007).



**Figura 6.** Estructura de la amilosa (a) y amilopectina (b).

*Fuente: Amaya (2019).*

El criogel es un sistema en el que se congela el almidón waxy, donde se cristaliza el solvente, y el soluto se concentra para producir una fuerte interacción polímero-polímero, induciendo a la reorganización de la amilopectina, disminuyendo el estado amorfo y aumentando la cristalinidad, lo que estabilizará la estructura, dicho proceso se muestra en la Figura 7, con la presentación del hidrogel(a), la criogelificación (b) y el criogel formado (c) a base de una proteína, donde el almidón sigue un proceso similar. La congelación criogénica es esencialmente un subconjunto de la congelación por inmersión, ya que utiliza directamente líquidos criogénicos, como nitrógeno líquido o dióxido de carbono sólido. Debido a las temperaturas de funcionamiento muy bajas y los altos coeficientes de transferencia de calor de la superficie entre el producto y el medio, las velocidades de enfriamiento de los sistemas criogénicos son más altas que otros sistemas de refrigeración (Wang y Xu, 2018).



**Figura 7.** Estados de formación de un criogel de proteína.

*Fuente: Ingavle et al. (2015).*

## **1.5 Carne**

Para el proceso de congelación-descongelación, es importante considerar la materia, en este caso la carne de cerdo, la cual deriva del músculo. Este último se define como el tejido contráctil del animal *in vivo*, mientras que la carne resulta de una serie de transformaciones del músculo tras la muerte del animal. Estos animales incluyen ganado doméstico como cerdos, ovejas, cabras y aves de corral, así como animales silvestres que incluyen ciervos, conejos y peces. La NOM-194-SSA1-2004 define como carne, a la estructura muscular estriada esquelética, acompañada o no de tejido conectivo, hueso y grasa, además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos; proveniente de los animales para abasto, que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas; se incluyen las refrigeradas o congeladas.

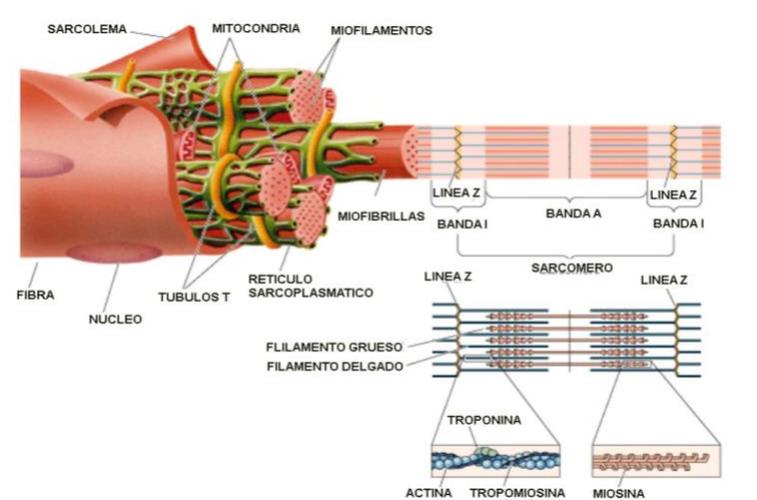
### **1.5.1. Estructura**

Existen tres tipos distintos de músculo que componen a un animal: músculos lisos, cardíacos y esqueléticos. Estos músculos se pueden distinguir por sus funciones, estructuras y control nervioso. El músculo liso es aquel que proporciona la elasticidad a las paredes de las arterias, los revestimientos de los tractos gastrointestinales, reproductivos, urinarios y respiratorios, así como el sistema linfático. Las proteínas en músculo liso, es decir la actina y miosina son la base de la contracción y el movimiento. El músculo cardíaco se encuentra solo en el corazón donde proporciona contracciones rítmicas a lo largo de la vida de un animal (Hui et al., 2012).

El músculo esquelético es el tipo más abundante en el cuerpo animal, desempeñan un papel importante en la locomoción y el control de la postura, así como para proteger los órganos vitales. Es este músculo, también conocido como estriado, el que da lugar a la carne tras la muerte del animal. La conversión de músculo a carne es un proceso complejo que involucra muchos cambios bioquímicos y físicos. El tejido muscular pasa de ser un sistema extensible y metabólicamente activo a uno que es inextensible e inactivo con respecto a sus reacciones bioquímicas. La velocidad del metabolismo *post mortem* tiene un efecto significativo en las propiedades finales (Hui et al., 2012).

La carne está compuesta por numerosos tipos de tejidos, incluyendo el nervioso, adiposo y conectivo. El tejido muscular esquelético constituye entre el 50 y 70% del peso de la carne. El músculo se divide en paquetes (también conocidos como fascículo) rodeados por otra funda de tejido conectivo, el perimysio y cada fibra o célula muscular se encierra en una capa delgada conocida como el endomisio. Estas fibras están compuestas por miofibrillas que forman parte de la unidad fundamental del músculo y se encuentran rodeadas por una membrana llamada sarcolema, la cual las ayuda a mantenerse unidas entre ellas o con el tejido conectivo (Onega, 2003).

Las miofibrillas son abundantes en células musculares esqueléticas, que representan entre el 80 y 90% del volumen de la célula, por lo tanto, las proteínas que las componen son muy importantes en la química de la carne y para determinar su funcionalidad. Son consideradas la "maquinaria" contráctil de la célula y a la unión de varias de ellas se les conoce como sarcómero, dando lugar a la unidad más básica de la célula. Estas se constituyen por dos tipos de filamentos: grueso y delgado, que se componen por diferentes proteínas. El filamento grueso se compone principalmente por miosina y proteínas C y M. El delgado está formado por actina, tropomiosina, troponina y  $\beta$ -actinina (Chacón, 2004). En la Figura 8, se esquematiza la estructura mencionada anteriormente.



**Figura 8.** Organización estructural del músculo.

*Fuente: Marieb, 2003*

La miosina es la proteína miofibrilar más abundante en el músculo esquelético, constituyendo aproximadamente el 50% de la proteína total. Es una proteína cargada negativamente, que consiste en una  $\alpha$ -hélice que forma la columna vertebral del filamento grueso y una región globular que se extiende desde el filamento grueso e interactúa con la actina en el filamento delgado. La actina es la segunda proteína más abundante en las miofibrillas, que representa aproximadamente el 20% del total. Otras dos proteínas que son importantes en la contracción muscular y están asociadas con el filamento delgado son la tropomiosina y la troponina. La acción cooperativa de estas en respuesta a los aumentos de calcio en el sarcoplasma regula la interacción entre la actina y la miosina y, por lo tanto, es un regulador importante de la contracción (James y James, 2010).

### 1.5.2 Composición

Como se mencionó anteriormente, la materia prima a evaluar es la carne de cerdo, la cual se compone en mayor parte de tejido muscular. La composición principal es agua, proteínas, y un bajo o nulo contenido de lípidos, como se muestra en la Tabla 1. Esta composición se modificará y dependerá de diversos factores, como son: la raza, la edad, el sexo, la alimentación que ha recibido el animal, etc. (Villarino, 2004).

**Tabla 1.** Composición química de la carne de cerdo.

| COMPONENTE | %    |
|------------|------|
| Agua       | 75.1 |
| Proteínas  | 22.8 |
| Lípidos    | 1.2  |
| Cenizas    | 1.0  |

*Fuente: FAO, 2015.*

Como se observa, el agua es el componente mayoritario. Esta se puede clasificar como libre, inmobilizada y ligada. La que se mantiene unida a la carne por fuerzas superficiales se denomina “agua libre” y es fácilmente expulsada. Después se tiene el “agua ligada”, siendo de aproximadamente el 4-5% del total del agua contenida, la cual está estrechamente asociada con las proteínas y es casi imposible de eliminar. Finalmente, la mayor proporción se encuentra como

“agua inmovilizada” (hasta el 80%), esta se une a las proteínas y otros componentes celulares con una fuerza menor que el agua ligada, es decir, a medida que se aleja el agua de los grupos reactivos de las proteínas va perdiendo fuerza (Horcada y Polvillo, 2010).

El segundo componente de importancia son las proteínas, las cuales están involucradas en el mantenimiento de la estructura y la organización de las fibras. Las proteínas del músculo son trascendentales en los cambios *post mortem* involucrados en la transformación del músculo en carne. Existen varias clasificaciones para estas proteínas: según su forma, composición, función biológica, su localización, y según su solubilidad, siendo esta última la más aceptada para clasificar las proteínas cárnicas. Según su solubilidad, existen tres divisiones: solubles en disolución salina diluida o sarcoplásmicas; solubles en disolución salina concentrada o miofibrilares; y las insolubles o estromales (Chacón, 2004).

Las proteínas sarcoplásmicas se involucran en procesos de señalización celular y enzimas, que son importantes en el metabolismo y la degradación de proteínas. Una de las más importantes es la mioglobina, la cual es la principal responsable del color de la carne y sirve como depósito o transportador de oxígeno en el músculo vivo. En cuanto a proteínas miofibrilares, estas incluyen tanto a las proteínas directamente involucradas en el movimiento como son la actina y miosina, conocidas también como las proteínas del aparato contráctil, y las proteínas reguladoras de las interacciones entre las proteínas contráctiles (proteínas regulatorias) como la troponina y tropomiosina.

La miosina es la que posee mayor capacidad de retención de agua, de emulsión y de gelificación. Esta junto con la actina, son las proteínas que influenciarán de manera principal la calidad final de la carne. La troponina es importante para el proceso de relajación y contracción del músculo. La tropomiosina se encuentra generalmente unida a la troponina formando la tropomiosina activa. Finalmente, como proteínas estromales se tienen al colágeno y elastina, las cuales influyen en la dureza de la carne (Onega, 2003).

Otros componentes de menor relevancia son los lípidos y carbohidratos. El contenido de lípidos del músculo puede variar por diversos factores, como la edad del animal, el nivel nutricional, etc., y este puede encontrarse entre el 1 y 13%. Es importante tener en cuenta que el contenido de lípidos varía inversamente con el contenido de agua. Los dos tipos principales de lípidos que se encuentran en el músculo esquelético son triglicéridos, que constituyen la mayor proporción, y los fosfolípidos. Finalmente, los carbohidratos conforman un porcentaje prácticamente nulo de tejido muscular, constituyéndose entre el 0.5 y 1.5%. El carbohidrato que constituye el mayor porcentaje es el glucógeno, pero también se pueden encontrar los glucosaminoglucanos que se asocian con el tejido conectivo (Hui, 2012).

## **1.6 Parámetros de calidad en la carne**

Las propiedades de la carne de cerdo fresca y procesada dependen de factores relacionados con la composición del producto. Sin embargo, es importante reconocer que no es solo la cantidad de estos componentes, sino las características de proteína, lípidos y agua, que son responsables de las diferencias en potencial de hidrógeno (pH), color, textura y capacidad de retención de agua. En muchos casos, son las proteínas de la carne de cerdo las que tienen mayor importancia en las variaciones que se observan en estos rasgos (Cheng, et al., 2021).

### **1.6.1 Potencial de hidrogeno (pH)**

Uno de los principales factores que influye en el comportamiento de las proteínas, en la carne de cerdo fresca y procesada, es el pH del producto. Este se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno. Esto quiere decir que a medida que aumenta la concentración de iones de hidrógeno, el pH disminuye. En pocas palabras, es la acidez relativa. Este parámetro puede afectar directamente la solubilidad, la función y la capacidad de ligar agua de una proteína. Como regla general, un valor bajo tiene un efecto perjudicial sobre estas características, por lo que la determinación y el control del pH, es de gran importancia en la industria alimentaria (Westphalen et al., 2005).

En carne fresca, Horcada y Polvillo (2010) mencionan que el pH es una característica que se ve afectada durante la conversión del músculo en carne. Lo que se observa al comparar los valores en

el animal vivo (6.7 - 7.2) y después de la matanza, donde el valor en la carne se sitúa en torno a 5.5. Este descenso se debe a que, tras la muerte del animal, se interrumpe la circulación sanguínea y en consecuencia el aporte de oxígeno al músculo, lo que provoca que al seguir la ruta glucolítica se degraden las reservas de glucosa del músculo para la obtención de energía incrementando la concentración de ácido láctico en el medio muscular, y en consecuencia un descenso del valor de pH.

En carne congelada y descongelada, el pH tiende a ser más bajo que antes de la congelación, esto debido a la desnaturalización de las proteínas lo que provoca la liberación de iones de hidrógeno y la consiguiente disminución. Alternativamente, la pérdida de líquido del tejido cárnico puede causar un aumento en la concentración de los solutos, lo que resulta en una disminución del pH. Otra explicación de este hallazgo puede implicar la desaminación de proteínas por acción microbiana o enzimática, con la consiguiente liberación de átomos de hidrógeno (Leygonie et al., 2012). Para determinar el pH existen diferentes métodos, los cuales pueden ser clasificados en dos grupos que se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Métodos para determinar la pH en alimentos

| <b>MÉTODO</b>         | <b>EJEMPLO</b>   |
|-----------------------|--|
| <b>Colorimétrico</b>  | <b>Papel indicador:</b> Estos contienen colorantes ligados a la celulosa que permiten obtener valores de manera económica, conveniente y rápida.   |
|                       | <b>Método de comparación:</b> Esto se lleva a cabo agregando cantidades similares de un indicador y una solución de referencia, si las dos soluciones tienen el mismo color, indica el mismo pH.     |
|                       | <b>Lovibond:</b> El color de la solución se compara con vidrios coloreados.  |
| <b>Electroquímico</b> | <b>Potenciómetro:</b> Un medidor que actúa como milivoltímetro de alta impedancia que está diseñado para convertir milivoltios a pH.   |
|                       | <b>Electrodo de vidrio:</b> El electrodo de vidrio consta de un bulbo de vidrio delgado que contiene una solución de pH constante. Al ser sensible a los iones H <sup>+</sup> , permite su medición. |

*Fuente: Webster (2003).*

Cuando se habla de productos cárnicos, el método conveniente es el electrodo de vidrio, este tiene como ventaja que el material se puede adaptar a bajas temperaturas y tiene una exactitud de  $\pm 0.2$ . Esta consideración de diseño, junto con las cuchillas opcionales de acero inoxidable, es ideal para mediciones de pH en productos como carnes y alimentos semi congelados.

### **1.6.2 Capacidad de Retención de Agua (CRA)**

La capacidad de retención de agua (CRA) es un parámetro físico-químico importante ya que permite estudiar el daño a la estructura de las proteínas miofibrilares, y esto se relaciona con la textura y color de la carne. Dicha retención de agua se produce en las fibras musculares, en las cadenas de actino-miosina. Los cambios en la CRA afectan al agua libre e inmovilizada, no llega a afectar al agua ligada. El agua libre será la que se extraiga con menor dificultad originando lo que se conoce como pérdida por goteo. Al aplicar una fuerza sobre el alimento, se podrá eliminar parte del agua inmovilizada y esta podrá ser utilizada como indicador de las propiedades de ligar el agua de las proteínas (Horcada y Polvillo, 2010).

La pérdida por goteo ocurre a lo largo de la cadena de frío, y representa una pérdida económica considerable para la industria cárnica. El potencial de pérdida por goteo es inherente a la carne fresca y está relacionado con el desarrollo de *rigor mortis* en el músculo después de la matanza y su efecto sobre el pH. Está influenciado por muchos factores. Algunos de estos, incluida la raza, la dieta y la historia fisiológica, son inherentes al animal vivo. Otros, como la velocidad de enfriamiento, las temperaturas de almacenamiento, la congelación y descongelación, ocurren durante el procesamiento (Morón y Zamorano, 2004).

Cuando la carne se congela rápidamente, el agua, tanto la liberada por las fibrillas como la que aún se mantiene en el interior de la carne, se congela simultáneamente. En consecuencia, no hay cambios en las posiciones o cantidades relativas del agua. Sin embargo, a velocidades de congelación más lentas, el equilibrio hídrico se altera y el agua extracelular se congela primero. A medida que continúa la congelación, los cristales de hielo existentes crecen a expensas del agua del espacio interfibrilar. Cuando se descongela la carne, ocurre lo contrario del proceso de congelación. El agua que se ha congelado se libera y debe restablecer el equilibrio con las proteínas

y sales musculares. Evidentemente, si las proteínas musculares se han desnaturalizado, reabsorberán menos agua. Dado que las fibras han sido comprimidas y distorsionadas por la formación de hielo, esta agua no absorbida estará en canales más anchos dentro de la estructura de la carne, aumentando así el goteo potencial (Onega, 2003).

El goteo excesivo puede tener un pequeño efecto en la calidad de la carne para consumo. La jugosidad percibida es uno de los atributos sensoriales importantes de la carne. La sequedad se asocia con una disminución en los otros atributos de palatabilidad, especialmente con la falta de sabor y una mayor dureza. Sin embargo, las pérdidas de humedad durante la cocción suelen ser de un orden de magnitud más altas que la mayoría de las pérdidas por goteo durante la refrigeración. Para determinar la CRA existen diferentes métodos, los cuales pueden ser clasificados en dos grupos que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Métodos para determinar la CRA de los alimentos

| <b>MÉTODO</b>                        | <b>EJEMPLO</b>             | <b>FUNDAMENTO</b>  |
|--------------------------------------|----------------------------|--|
| <b>Basado en una pérdida de peso</b> | Pérdidas por goteo         | Pérdida de peso de la muestra de carne tras mantenerla en almacenamiento.          |
|                                      | Pérdidas por cocción       | Cálculo del agua expulsada de una muestra, una vez que ha sido sometida a cocción. |
|                                      | Presión en papel de filtro | Medida del agua expulsada al aplicar una presión elevada por dos placas.           |
| <b>Técnicas de laboratorio</b>       | Centrifugación             | Peso de agua liberada de la muestra al centrifugar a baja o alta velocidad         |
|                                      | Porcentaje de transmisión  | En las variaciones de la solubilidad de las proteínas.                             |

*Fuente: Warner (2017).*

El método de presión en papel filtro es uno de los más utilizados por su rapidez, fiabilidad y sencillez. La determinación del agua expulsada se puede realizar de tres formas: por diferencia de pesada de la carne antes y después o del papel de filtro que ha absorbido el agua y por cálculo del

área de este papel de filtro, sin tener en cuenta la zona ocupada por la carne una vez comprimida o por un sistema óptico electrónico (análisis de imagen). Es adecuado sobre todo para mediciones en carne fresca así como las pérdidas durante el almacenado en refrigeración. Como excepción este método no es aplicable a muestras que contengan gran cantidad de grasa o agua (Warner, 2017).

### **1.6.3 Perfil de color**

El atributo sensorial de la carne que tiene mayor influencia en la elección del consumidor es sin duda el aspecto visual, ya que es percibido antes que otras cualidades, como olores, sabores o textura. Por lo que es importante buscar el menor efecto en este durante el procesamiento de los alimentos. El color es una característica de luz, determinada por la composición espectral de la luz y la interacción con el ojo humano. Es por ello, que el color es un fenómeno psicofísico y la percepción del color es subjetiva. Esta característica depende no solo de la muestra, sino también de la fuente de luz y el detector, ya sea humano o instrumental, dando diferentes respuestas de medición como consecuencia de diferentes condiciones experimentales. Esto implica que cualquier tipo de evaluación del color debe realizarse de acuerdo con condiciones estandarizadas, preferiblemente utilizando instrumentos específicos (AMSA, 2012).

Uno de los factores principales que influyen en los cambios en el color es la temperatura, se ha demostrado que un almacenamiento a 0 °C permite conservar el color por mayor tiempo, retardando las reacciones, ya que se incrementa la profundidad a la cual el oxígeno puede penetrar y reaccionar. El color de la carne congelada también se puede ver afectado por la velocidad de congelación, ya que los cristales pequeños de la congelación rápida dispersan más luz que los cristales grandes de la congelación lenta, lo que da como resultado que la carne congelada rápidamente sea opaca y pálida y, la carne congelada lentamente sea translúcida y oscura (AMSA, 2012).

En la carne descongelada, la velocidad de oxidación del pigmento aumenta ya que el incrementar la temperatura se acelera las reacciones de oxido-reducción de los pigmentos musculares y un aumento de los procesos de oxidación lipídica, contribuyendo así a la mayor decoloración de la carne, por lo tanto, el color será menos estable que en la fresca. La carne que ha perdido su coloración durante la congelación, debido a la oxidación de la oximioglobina en la superficie,

permanecerá marrón después de la descongelación. Otro fenómeno que se puede observar son las quemaduras por frío, que se hacen notar en forma de manchas pardas, este es el resultado de la deshidratación superficial, que puede ser evitada envasando antes de congelar con una película impermeable (Dang et al., 2021).

Existen diferentes métodos para la medición del color, estos son los químicos, sensoriales e instrumentales. Los métodos químicos se basan en la medición de los pigmentos como la mioglobina y la hemoglobina. Los métodos sensoriales son resultado de una observación directa por personal calificado que dan una valoración global o cromática, y/o aceptabilidad según el color. Y los instrumentales que reproducen con precisión el color, siendo lo más utilizados. En estos se incluyen reflectómetros, colorímetros, espectrocolorímetros y espectrofotómetros. Este último es un instrumento que responde mejor a las necesidades de investigación en el campo del color ya que permiten la obtención de un espectro de reflexión en todo el campo de la luz visible, lo que posibilita el cálculo de todas las características del color (Dang et al., 2021).

La escala colorimétrica más utilizada en la actualidad es la CIELAB, que se basa en los tres parámetros de color, expresados como  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . Donde  $L^*$  expresa la luminosidad, con 0 asociado al negro (absorción completa de la luz) y 100 al blanco (reflexión completa). La coordenada  $a^*$  indica el nivel de enrojecimiento (o tendencia a verde), ya que los dos colores son complementarios, oscilando entre -60 (verde puro) y 60 (rojo puro). Por último, la coordenada  $b^*$  indica amarillez (o tendencia a azul), que también varía entre -60 (azul puro) y 60 (amarillo puro). Si se realiza un análisis comparativo, los valores delta ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ) indican cuánto difieren una muestra a analizar con respecto a su muestra control y esto se puede calcular con la diferencia de color total ( $\Delta E^*$ ) (AMSA, 2012).

#### **1.6.4 Fuerza de corte**

La textura aparece como una percepción psicoquímica compleja y multidimensional. Se puede definir como la unión de las propiedades reológicas y de estructura de un producto alimenticio, perceptibles por los receptores mecánicos, táctiles y eventualmente visuales y auditivos, condicionando la apetencia de un alimento. En cuanto a fuerza de corte se pueden determinar diferentes cualidades como son la terneza, dureza y firmeza. La terneza es la cualidad de la carne

de dejarse cortar y masticar (con mayor o menor facilidad) antes de la deglución, estando directamente ligada a la resistencia mecánica del producto consumible. El caso contrario sería la dureza, definida como la propiedad manifestada por una alta y persistente resistencia a la rotura en la masticación. Y la firmeza se define como la propiedad representada por una alta resistencia a la deformación por aplicación de una fuerza, siendo registrada tras los primeros mordiscos. La carne puede considerarse como la suma de tres componentes: facilidad de penetración de los dientes en la carne al inicio de la masticación, facilidad de fragmentación de la carne y cantidad de residuo que queda en la boca concluida la masticación (Horcada y Polvillo, 2010).

La fuerza de corte en la carne se verá afectada por tres factores principales: la edad avanzada del animal, la contracción de la fibra muscular que puede ocurrir durante el enfriamiento, y la falta de grasa. Existe evidencia de que la velocidad de congelación afecta la tasa de ablandamiento después de la descongelación, pero no la sensibilidad final. La congelación a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  duplica la velocidad, mientras que la congelación en nitrógeno líquido casi triplica la velocidad. Se sabe que la congelación causa daño estructural por la formación de cristales de hielo. Parece probable que los cristales de hielo, en particular los pequeños cristales de hielo intracelulares formados por velocidades de congelación muy rápidas, aumenten la velocidad de envejecimiento mediante la liberación de enzimas (Dang et al, 2021).

Inicialmente, los instrumentos como el texturómetro, fueron desarrollados para estudiar la fuerza máxima requerida para cortar una muestra de un tamaño y forma determinados. Además de estos, las mediciones también pueden hacerse con sondas, como la cuchilla Warner-Bratzler y la celda de Kramer, que consiste en medir la fuerza necesaria para penetrar la superficie del producto, algo similar a la primera mordida, seguida de la resistencia que opone el alimento. Actualmente, se han estudiado varios métodos analíticos para su uso potencial; algunos de ellos son la espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) o espectroscopía Raman. Sin embargo, aunque existen diversos métodos y muchos instrumentos disponibles para evaluar la fuerza de corte de los productos cárnicos, aquellos que proporcionan una medición de las diferentes propiedades que componen el análisis de perfil de textura son los que se utilizan mayormente, como en el caso del texturómetro (Dang et al., 2021).

## Capítulo 2. Metodología Experimental

### 2.1 Diagrama experimental

Para el desarrollo de la presente tesis, se plantearon una serie de actividades y objetivos que permitieron llegar a los resultados obtenidos. Dicha información se presenta a continuación en la Figura 9, en formato de diagrama experimental, en el que se presenta una explicación general.

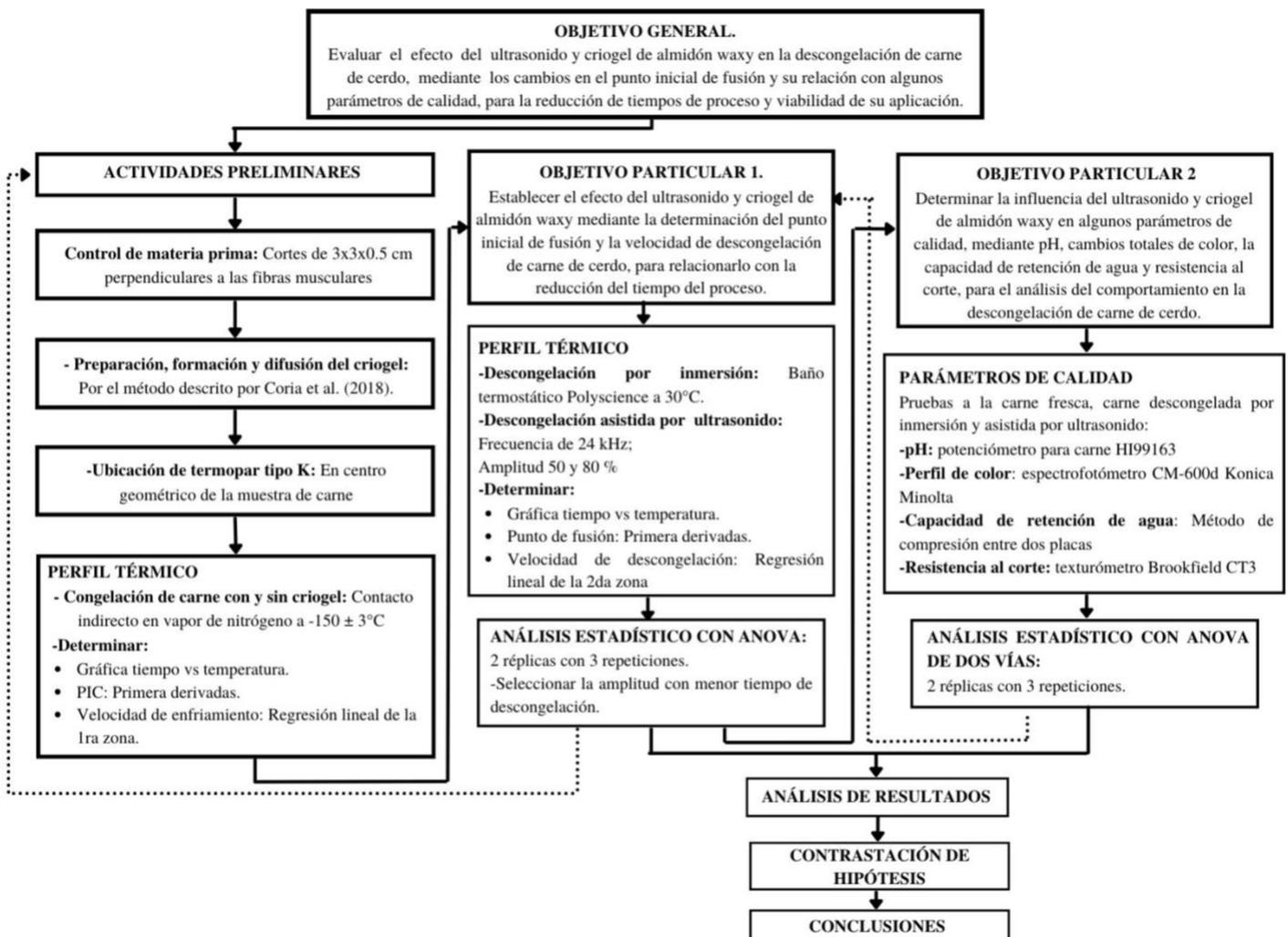


Figura 9. Diagrama experimental.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

## **2.2 Descripción del diagrama experimental**

A continuación, se describen de forma detallada los objetivos y el desarrollo anteriormente presentados. Se llevaron a cabo una serie de pasos que incluyen las actividades preliminares y diferentes etapas para la obtención de los resultados.

### **2.2.1 Objetivos e hipótesis**

#### **Objetivo general**

Evaluar el efecto del ultrasonido y criogel de almidón waxy en la descongelación de carne de cerdo, mediante los cambios en el punto inicial de fusión y su relación con algunos parámetros de calidad, para la reducción de tiempos de proceso y viabilidad de su aplicación.

#### **Objetivos particulares**

##### **Objetivo particular 1**

Establecer el efecto del ultrasonido y criogel de almidón waxy mediante la determinación del punto inicial de fusión y la velocidad de descongelación de carne de cerdo, para relacionarlo con la reducción del tiempo del proceso.

#### **Variables**

V.I. Aplicación de criogel de almidón waxy y método de descongelación.

V.D. Diferencias de temperatura en la carne de cerdo.

V.R. Punto inicial de fusión, tiempo y velocidad de descongelación.

N.V. Con y sin criogel, y descongelación en inmersión en agua y por ultrasonido de amplitud al 50 y 80%.

#### **Hipótesis**

En carne de cerdo con criogel de almidón waxy, la frecuencia y amplitud del ultrasonido en la descongelación favorecerá la transferencia térmica lo que se verá reflejado en la disminución del tiempo de descongelación comparado con la descongelación convencional por inmersión.

## **Objetivo particular 2**

Determinar la influencia del ultrasonido y criogel de almidón waxy en algunos parámetros de calidad, mediante pH, cambios totales de color, la capacidad de retención de agua y resistencia al corte, para el análisis del comportamiento en la descongelación de carne de cerdo.

## **Variables**

V.I. Aplicación de criogel de almidón waxy y método de descongelación.

V.D. ph, coordenadas L\*, a\* y b\*, y esfuerzo.

V.R. % de exudados,  $\Delta E^*$  y fuerza de corte.

N.V. Criogel de almidón waxy (con y sin) y descongelación (por inmersión en agua y ultrasonido de amplitud con menor tiempo de descongelación)

## **Hipótesis**

En carne de cerdo con criogel de almidón waxy, la frecuencia y amplitud del ultrasonido en la descongelación mejorará la capacidad de retención de agua, existirán menores cambios en pH, color superficial y resistencia al corte por menor daño en la estructura muscular comparado con la descongelación convencional por inmersión.

### **2.2.2 Actividades preliminares**

#### **Control de la materia prima**

La experimentación se trabajó con carne de cerdo de machos castrados de 6 meses de edad, de la raza Pietrain, sacrificados en condiciones estandarizadas y con un tiempo de 24 h *post mortem*. Obtenida del mismo rastro ubicado en Cuautitlán Izcalli, Estado de México. El corte utilizado para el estudio es el músculo *Longissimus thoracis*; del que se obtuvieron muestras en forma de placas de 3 cm de largo, 3 cm de ancho y 0.5 cm de espesor. Las cuales se analizaron en términos de pH, color, fuerza de corte y CRA, cada uno en 2 réplicas con 3 repeticiones.

### **Preparación, formación y difusión del criogel**

Para el desarrollo de esta investigación, la preparación, formación y difusión del criogel se realizó como se indica en el trabajo de Coria et al. (2018). En donde el almidón de maíz waxy ( $-C_6H_{10}O_5-n$ ; Firm-Tex, Ingredion, México) se dispersó en agua a 675 rpm, durante 2 h a 40 °C. Se congeló por inmersión en nitrógeno líquido a  $-150 \pm 3$  °C, durante 10 min y se descongeló por inmersión en agua a  $50 \pm 5$  °C durante 30 min hasta completar 2 ciclos. Finalmente, la difusión del criogel al interior de la matriz cárnica se asistió por ultrasonido de sonda UP200S con frecuencia constante (24 kHz) en 0.8 ciclos y con amplitud de 80% durante 6 minutos.

### **Congelación con y sin criogel**

La congelación de las muestras con y sin criogel se realizó colocando termopares tipo K en el centro geométrico de cada una de las muestras para posteriormente congelar por contacto indirecto en nitrógeno líquido, cuyo vapor alcanza una temperatura de  $-150 \pm 3$  °C, hasta que la muestra alcanzó una temperatura de  $-25$  °C. Se realizó un perfil térmico (tiempo vs temperatura) para la obtención de Punto Inicial de Congelación (PIC) y la velocidad de enfriamiento. Esto se realizó en dos lomos de diferentes cerdos (dos réplicas) en tres muestras diferentes (tres repeticiones) para un total de 12 muestras. Las muestras que sirvieron para pruebas de calidad se almacenaron en una cámara de convección forzada Torrey (México) en condiciones de temperatura de  $-26 \pm 2$  °C durante un tiempo máximo de 5 días.

### **2.2.3 Objetivo particular 1**

#### **Descongelación por inmersión y asistida por ultrasonido**

La descongelación por inmersión se llevó a cabo en un baño termostático Polyscience, con agua a 30 °C, hasta que la muestra llegó a una temperatura final de 25 °C. Para la descongelación asistida por ultrasonido, se utilizó un baño ultrasónico ColeParmer a 37 kHz, 400 W y amplitud de 50 y 80%. Se registró la lectura del termopar en intervalos de tiempo de 30 segundos. Con lo que se realizó un perfil térmico (tiempo vs temperatura) que permitió obtener los datos de Punto Inicial de Fusión (PIF) y velocidad de descongelación. Para obtener el PIF, se trató la primera zona del perfil térmico, por medio de la primera derivada, que permitieron encontrar los puntos de inflexión

y, para determinar la velocidad de descongelación se trató la segunda zona del perfil térmico por medio de una regresión lineal que permitió obtener la pendiente y con esto el dato puntual de la velocidad. Lo anterior se realizó en dos lomos de diferentes cerdos (dos réplicas) en tres muestras diferentes (tres repeticiones) congeladas en las condiciones mencionadas en apartado de actividades preliminares, para un total de 18 muestras. Las muestras descongeladas en ultrasonido fueron analizadas en términos de velocidad de descongelación, CRA y Fuerza de Corte para la selección de la condición (50 u 80%) que sirvió para el Objetivo Particular 2.

#### **2.2.4 Objetivo particular 2**

##### **Potencial de hidrógeno (pH)**

Se determinó con un potenciómetro para carne HI99163 (Hanna Instruments) calibrado a tres puntos con soluciones estándar, de acuerdo con Jansen (2001). Lo anterior se realizó en dos lomos de diferentes cerdos (2 réplicas) en tres muestras diferentes (3 repeticiones), como control de materia prima durante la recepción de la carne de cerdo, así como después de la congelación con y sin criogel y, con ambos métodos de descongelación para un total de 18 muestras.

##### **Perfil de color**

Los parámetros de perfil de color se determinaron por el método de Zonglin, et al. (2021) con un espectrocolorímetro EZ 4500L (HunterLab), obteniendo los valores de las coordenadas triestímulo en sistema CIE ( $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ). Colocando un lente anti-reflejante sobre la superficie de la muestra y presionando el espectrocolorímetro sobre el mismo para tomar una lectura directa y registrando cada valor para su posterior tratamiento. Se obtuvieron en dos réplicas de dos lomos diferentes y con tres repeticiones (3 muestras diferentes) por cada tratamiento. Esto durante la recepción de la materia prima y después de los métodos de congelación-descongelación para un total de 18 muestras. Los valores registrados sirvieron para determinar los cambios totales de color ( $\Delta E^*$ ), mediante la Ecuación 1.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

### **Capacidad de Retención de Agua (CRA)**

El método utilizado para determinar la CRA, fue el de Cañeque y Sañudo (2005), colocando las muestras entre dos papeles absorbentes de 5 x 5 cm y ubicándola en una prensa formada por dos placas metálicas. Donde se aplicó una fuerza de 2.5 kg<sub>f</sub> durante 10 min, para posteriormente retirar la muestra y registrar el peso del papel filtro. Esto se realizó a dos réplicas obtenidas de dos lomos distintos, con tres repeticiones (3 muestras diferentes) por cada tratamiento. Durante la recepción de la materia prima y después de los métodos de congelación-descongelación, para un total de 18 muestras. La cantidad de exudados se obtuvo a partir de los datos registrados utilizando la Ecuación 2 y se restaron del 100% para finalmente obtener la CRA.

$$\% \text{ de exudados} = \frac{\text{Peso final del papel} - \text{peso inicial del papel}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

### **Resistencia al corte**

Se siguió la metodología descrita por la AMSA (2016), utilizando un texturómetro CT3 (Brookfield). Donde las muestras se colocaron con las fibras musculares perpendiculares a la cuchilla plana. La velocidad de prueba fue de 1.5 mm/s y con carga de activación de 50 g<sub>f</sub> a temperatura controlada de 20 a 25 °C. Realizándose dos réplicas (2 lomos distintos) con tres repeticiones (3 muestras diferentes) por cada tratamiento. Durante la recepción de la materia prima, así como después de la congelación con y sin criogel y, con ambos métodos de descongelación para un total de 18 muestras.

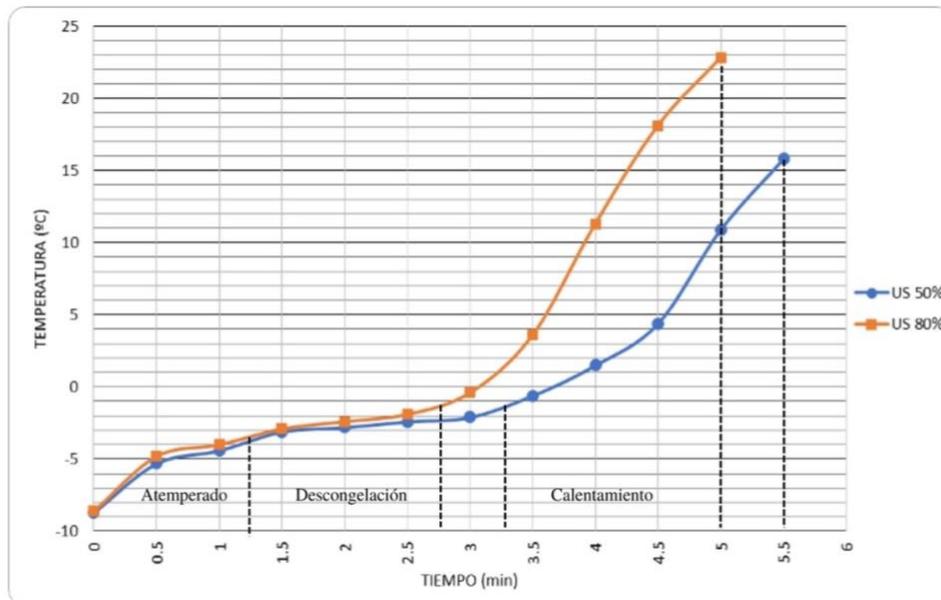
### **Análisis estadístico**

Para todos los casos se obtuvieron las medidas de dispersión y de tendencia central, así como los ANOVA de 1 o 2 vías con sus respectivas pruebas de contrastación de hipótesis. En los casos necesarios se realizaron tratamientos de regresión lineal y no lineal, los cuales se analizaron con el software Minitab 16.0.1.

## Capítulo 3. Análisis y Discusión de Resultados

### 3.1 Selección de condiciones

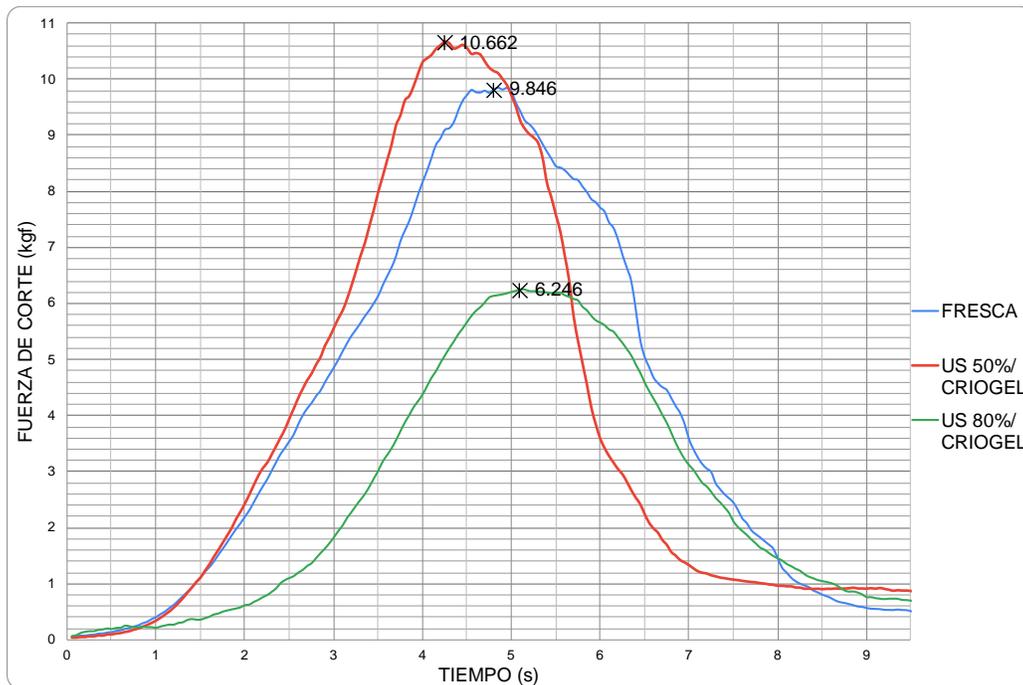
Uno de los aspectos principales para cubrir el Objetivo Particular 1, es la selección de la condición de ultrasonido (amplitud 50 u 80%) que muestre mayores beneficios en la descongelación de carne de cerdo. Se congelaron muestras adicionadas con criogel, de acuerdo a las condiciones mencionadas en el apartado anterior de actividades preliminares, que posteriormente pasaron al baño de ultrasonido donde, se consideró como primer punto el tiempo de proceso, por lo que se realizó el perfil térmico (Figura 10), en el se observa que en la amplitud del 80% existe una disminución en el tiempo de descongelación (0.5 min), misma diferencia que se observa en la etapa de calentamiento, y un aumento en la velocidad (1.36 °C/min en carne adicionada con criogel y descongelada con US 80% y 0.68 °C/min en carne adicionada con criogel y con US 50%). Esto se produce por el mecanismo de cavitación, en donde, con una amplitud mayor se produce una mayor cantidad de energía, que conduce a cambios físicos y químicos en las estructuras biológicas que benefician la transferencia de calor y la ruptura de los cristales de hielo (Liqing et al., 2020).



**Figura 10.** Historial térmico de descongelación de carne con criogel en ultrasonido.

Sin embargo, aunque la amplitud de 80% mostraba ventajas, reduciendo el tiempo de descongelación, se observó que presentaba mayor cantidad de exudados, por lo que se optó por considerar algunas pruebas de calidad (CRA y fuerza de corte) para tener una selección de condiciones mas acertada.

El cálculo de porcentaje de exudados indicó que existe una pérdida de 14.56% en descongelación con US-80% y 12.85% en descongelación con US-50%, lo que se explica con el efecto que producen las ondas generadas por el ultrasonido y que contribuyen a la modificación de las estructuras proteínicas, generando un mayor daño estructural que propicia una mayor pérdida de exudados (Stadnik et al., 2008). Lo anterior se comprueba en el gráfico de fuerza de corte que se muestra en la Figura 11, donde la resistencia al corte es menor en la carne descongelada con ultrasonido al 80% (6.246 kgf en US 80% y 10.662 kgf en US 50%). Esto indica que se generó un mayor grado de afectación a nivel estructural, originado por la cavitación que induce una mayor fragmentación de la estructura del sarcómero (Morales y Martínez, 2019).



**Figura 11.** Fuerza de corte (kg<sub>f</sub>) en las muestras de carne analizadas.

Finalmente, con los resultados obtenidos se seleccionó la descongelación con ultrasonido a una amplitud del 50% para continuar con el desarrollo de la experimentación. Siguiendo el orden de congelación de carne, descongelación en inmersión y ultrasonido 50% y, terminando con las pruebas de calidad.

### 3.2 Congelación – descongelación

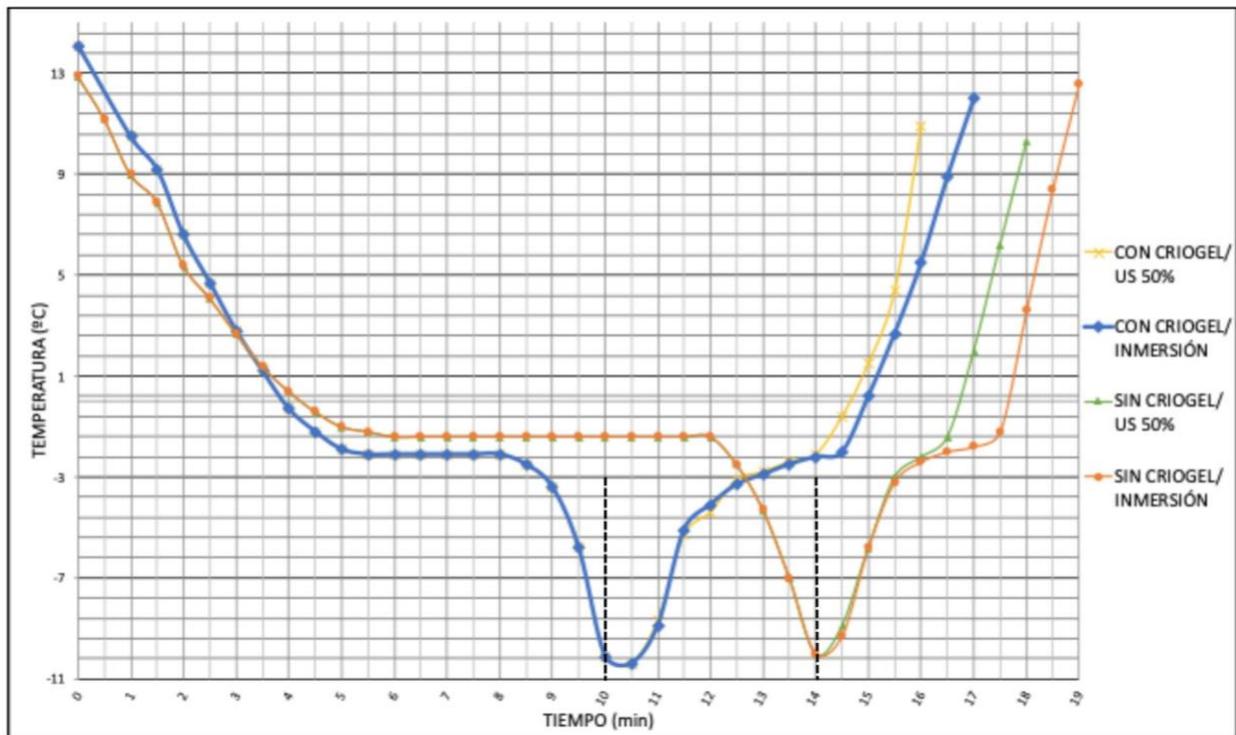
Al haber seleccionado las condiciones, y con los datos obtenidos en la congelación y descongelación de carne fresca y adicionada con criogel de almidón waxy, se realizaron los perfiles térmicos (Figura 12). Donde, las líneas punteadas delimitan del lado izquierdo el proceso de congelación y de lado derecho la descongelación. En dicha figura se observa el efecto del crioprotector al disminuir el PIC, es decir, extiende el subenfriamiento por su interacción con moléculas de agua a través de puentes de hidrógeno. Estas interacciones reducen el grado de unión de las moléculas de agua y modifica su estructura tridimensional, provocando que la formación de hielo se retrase, lo que respetaría los principios de las propiedades coligativas. Los valores experimentales del PIC se muestran en la Tabla 4 en comparación a valores de referencia observando que los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Coria, 2019.

De igual forma, se presenta una disminución en el tiempo de congelación (10 min para carne fresca y 14 min en carne adicionada con criogel waxy) y, un aumento en la velocidad de enfriamiento (2.81 °C/min para carne fresca y 4.31 °C/min en carne adicionada con criogel waxy), que deriva de la interacción del polisacárido del criogel de almidón waxy y el agua, donde se forman redes que limitan el agua congelable, evitando salidas osmóticas y aumentando el área superficial de contacto al formar cristales de hielo de menor tamaño que propician una mayor transferencia de calor (Cruz et al., 2006).

**Tabla 4.** Valores de PIC en carne fresca y con criogel-US comparado con referencias.

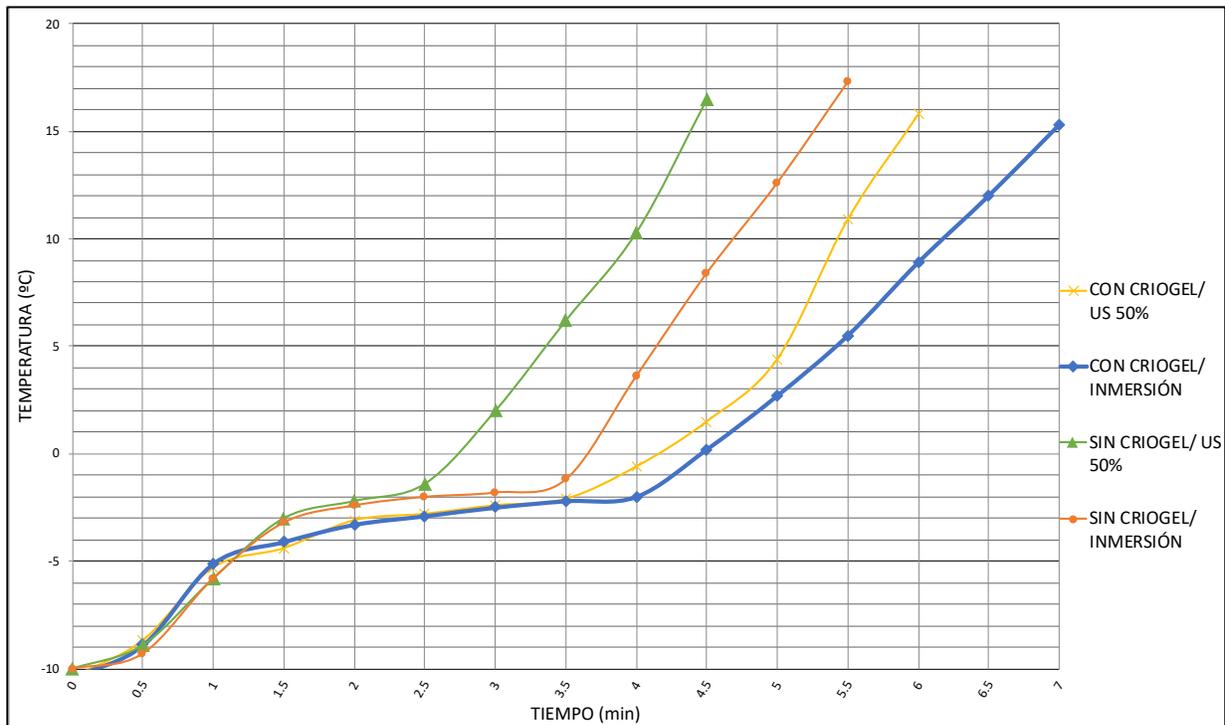
|                 | CARNE FRESCA   |                     | CARNE CON CRIOGEL-US |                     |
|-----------------|----------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|                 | Valor obtenido | Valor de referencia | Valor obtenido       | Valor de referencia |
| <b>PIC (°C)</b> | -1.40          | -1.26 ± 0.002       | -2.10                | -2.08 ± 0.002       |

*Fuente: Coria (2019)*



**Figura 12.** Perfil térmico de congelación de carne fresca y con criogel, y descongelación en inmersión y ultrasonido.

Las diferencias en el tiempo de congelación influyeron en el inicio de la descongelación, por lo que se realizó un acercamiento a dicho proceso, iniciando en un tiempo 0 para cada tratamiento, lo que permitió contrastarlos (Figura 13). En ella se muestra el efecto del criogel al disminuir el PIF y la velocidad de descongelación (Tabla 5). Lo anterior se explica por la interacción del polisacárido en los cristales de hielo, actuando como una barrera que limita la transferencia de calor. Ya que, sin la adición de criogel, se forman cristales de hielo de mayor tamaño, donde no sólo predominará el mecanismo de transferencia de calor por convección si no que beneficia la transferencia por conducción entre las moléculas de agua (Welti et al., 2005).



**Figura 13.** Historial térmico de descongelación de carne fresca y con criogel, por los métodos de inmersión y ultrasonido.

**Tabla 5.** Valores de PIF y velocidad de descongelación de los diferentes tratamientos.

| TRATAMIENTO                                 | PIF (°C)    | VELOCIDAD DE DESCONGELACIÓN (°C/min) |
|---|-------------|--------------------------------------|
| Carne con criogel descongelada con US 50%   | -3.1 a -3.3 | 0.65 ± 0.02                          |
| Carne con criogel descongelada en inmersión |             | 0.59 ± 0.02                          |
| Carne sin criogel descongelada con US 50%   | -2.2 a -2.4 | 1.7 ± 0.18                           |
| Carne sin criogel descongelada en inmersión |             | 0.95 ± 0.03                          |

Finalmente, al analizar el efecto de los métodos de descongelación aplicados, se observa que el ultrasonido aumenta la velocidad de descongelación, lo que se explica con el fenómeno de cavitación mencionado anteriormente que favorece la transferencia de calor, donde las ondas de

impacto generadas por el ultrasonido propician un mecanismo de convección forzada, provocando colisiones moleculares, que contribuyen a un rápido aumento de temperatura (Liqing et al., 2020).

### 3.3 Pruebas de calidad

Después de analizar el comportamiento térmico durante la congelación y descongelación de la carne de cerdo se logró finalizar el Objetivo Particular 1, por lo que se realizaron diversas pruebas de calidad para cubrir el Objetivo Particular 2 y complementar el estudio. Dichas pruebas fueron en términos de potencial de hidrógeno (pH), capacidad de retención de agua (CRA), parámetros de perfil de color y análisis de fuerza de corte.

#### 3.3.1 pH

El pH, como una medida de la cantidad de iones de hidrógeno libres ( $H^+$ ) en una solución y donde los resultados obtenidos (Tabla 6) concuerdan con lo indicado por Cheng et al. (2021); Coria et al. (2021) y Leygonie et al. (2012), mostrando que la calidad de la carne fresca es aceptable y que el pH de la carne congelada-descongelada tiende a ser más bajo que antes de la congelación (carne fresca), esto último se explica por diversos factores.

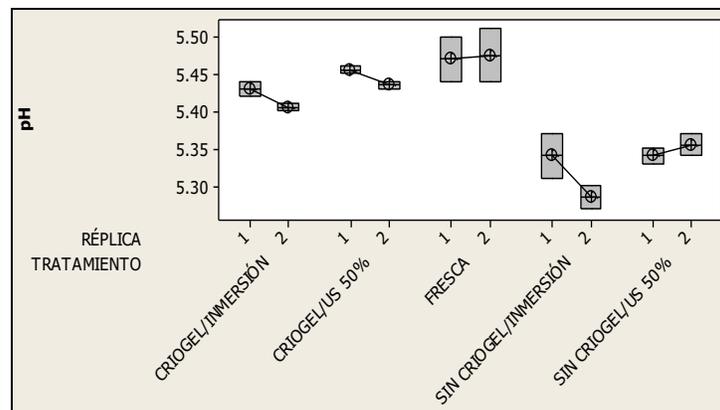
**Tabla 6.** Valores promedio de pH en los diferentes tratamientos.

| TRATAMIENTO                                 | pH          |
|---|-------------|
| Carne fresca                                | 5.47 ± 0.04 |
| Carne con criogel descongelada con US 50%   | 5.44 ± 0.01 |
| Carne con criogel descongelada en inmersión | 5.41 ± 0.02 |
| Carne sin criogel descongelada con US 50%   | 5.34 ± 0.02 |
| Carne sin criogel descongelada en inmersión | 5.31 ± 0.04 |

Al analizar la carne descongelada, en términos de adición del polímero (con y sin), se puede observar que las muestras adicionadas con criogel mantienen un valor cercano a la carne fresca, esto se debe a que el polímero tiene características anfólicas que no modifica las cargas y mantiene el equilibrio de  $H^+$ . Haciendo el análisis en cuanto al método de descongelación, en inmersión, se

muestran valores menores en comparación al ultrasonido, esto debido a que la muestra se mantiene a una temperatura elevada en un mayor tiempo, lo que provoca la desnaturalización de las proteínas, permitiendo la liberación de iones de hidrógeno y la consiguiente disminución del pH. Además, en esta desnaturalización proteínica, existe pérdida de agua, lo que provoca un aumento en la concentración de los solutos y que resulta en una disminución del pH (Leygonie et al., 2012).

En la Figura 14 se presentan los resultados estadísticos, derivados del ANOVA de dos vías, que comprueban que el pH de las muestras adicionadas con criogel son estadísticamente iguales al pH de la carne fresca, sin embargo, existen diferencias significativas con relación a las muestras que no contenían criogel. Al comparar los resultados de los métodos de descongelación no muestran diferencias estadísticamente significativas. Esto demuestra que el factor principal que influye sobre el pH es la adición del criogel.



**Figura 14.** Gráfica de caja de pH en los diferentes tratamientos.

### 3.3.2 Capacidad de Retención de Agua

La capacidad de retención de agua tiene relación con el pH, esto se puede observar en los resultados de la Tabla 7, donde los valores representan la pérdida de agua expresados en porcentaje y que siguen una tendencia similar al pH, es decir, existe una pérdida mayor en las muestras sin adición de criogel y en descongelación por inmersión.

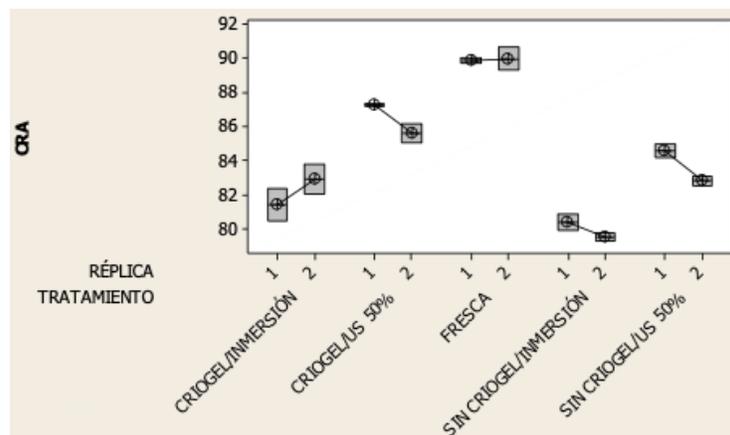
**Tabla 7.** Valores promedio de CRA en los diferentes tratamientos.

| <b>TRATAMIENTO</b>                          | <b>CRA (%)</b> |
|---|----------------|
| Carne fresca                                | 89.91 ± 0.57   |
| Carne con criogel descongelada US 50%       | 87.17 ± 1.03   |
| Carne con criogel descongelada en inmersión | 82.15 ± 1.35   |
| Carne sin criogel descongelada US 50%       | 83.69 ± 1.09   |
| Carne sin criogel descongelada en inmersión | 79.94 ± 0.66   |

Lo anterior se explica debido a que el pH es uno de los factores involucrados en la modificación del punto isoeléctrico en las proteínas y por ende propiciar la desnaturalización de las proteínas afectando su estructura. Además, esta modificación del pH, combinada con el aumento en la temperatura, provoca la reactivación enzimática, principalmente de catepsina, que provoca la degradación proteínica, lo que propicia una mayor salida de líquido (Hughes et al., 2014).

Sin embargo, en el ANOVA de dos vías representado en la Figura 15, se puede observar que el pH no es el único factor que afecta a la CRA. En ella se comprueba que las condiciones de la carne cambian, sin embargo, el criogel no indica un efecto estadísticamente diferente entre las muestras, a comparación del método de descongelación donde existen grandes diferencias significativas. Lo anterior demuestra que el factor principal que influye sobre la CRA es el método de descongelación.

Se comprueba lo mencionado en apartados anteriores, donde se indica que el ultrasonido facilita la transferencia de calor sin generar un daño mayor a las estructuras proteínicas. A diferencia del método de inmersión, donde la velocidad de descongelación es menor y Dang et al. (2021) han demostrado que la velocidad a la que la temperatura del producto disminuye de -1 a -7 °C influye en la cantidad de agua perdida durante la descongelación, debido a que producen una mayor desnaturalización de proteínas y provoca una mayor ruptura de las fibras musculares. Es importante mencionar que la cantidad de agua en la carne tendrá influencia en otros parámetros como son el perfil de color y fuerza de corte.



**Figura 15.** Gráfica de caja de CRA en los diferentes tratamientos.

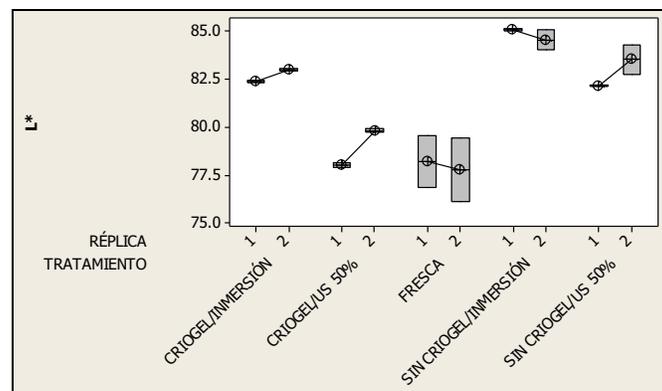
### 3.3.3 Parámetros de perfil de color

Después de obtener los datos de los parámetros de color en dos tratamientos con tres repeticiones y realizar un ANOVA de dos vías, se obtuvieron las medias de cada coordenada en el sistema CIE ( $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ) y de la diferencia total de color ( $\Delta E^*$ ), dichos resultados se muestran en la Tabla 8 y coinciden con lo reportado por Cheng et al. (2021) y Coria et al. (2021). De acuerdo con el apartado anterior, los parámetros de perfil de color tienen relación con la CRA, esto se comprueba al observar que siguen una tendencia similar, ya que la cantidad de exudados tiene influencia en la luminosidad que se representa con la coordenada  $L^*$ , además de que la mioglobina es una proteína soluble en agua que se pierde junto con los fluidos que exudan de la carne y que modifican los valores de  $a^*$  y  $b^*$ .

**Tabla 8.** Valores promedio de parámetros de color de las muestras de carne.

| TRATAMIENTO                                 | $L^*$            | $a^*$            | $b^*$            | $\Delta E^*$     |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Carne fresca                                | $77.97 \pm 1.76$ | $27.55 \pm 1.33$ | $12.70 \pm 0.87$ | -                |
| Carne con criogel descongelada US 50%       | $78.93 \pm 1.04$ | $22.81 \pm 0.87$ | $12.10 \pm 0.75$ | $5.37 \pm 0.74$  |
| Carne con criogel descongelada en inmersión | $82.70 \pm 0.36$ | $20.82 \pm 2.50$ | $11.77 \pm 1.30$ | $9.74 \pm 1.02$  |
| Carne sin criogel descongelada US 50%       | $82.83 \pm 1.00$ | $20.69 \pm 2.13$ | $11.96 \pm 1.73$ | $8.69 \pm 1.33$  |
| Carne sin criogel descongelada en inmersión | $84.81 \pm 0.52$ | $18.84 \pm 3.04$ | $16.15 \pm 0.87$ | $10.88 \pm 1.87$ |

En la Figura 16 se muestra que, en la carne con criogel y descongelada con US, no existe diferencia significativa en comparación a la muestra de carne fresca, caso contrario en los demás tratamientos. Esto se explica, ya que a medida que disminuye la CRA, hay un aumento en la birrefringencia intrínseca, es decir, las propiedades anisotrópicas de las moléculas, modifican la elasticidad de las ondas luminosas, lo que se representa con una mayor dispersión de la luz y un aumento en la luminosidad ( $L^*$ ). Los espacios generados entre las miofibrillas por la desnaturalización de las proteínas, la reducción de la CRA y la disrupción del sarcolema, son algunos cambios estructurales clave que aumentan la luz reflejada (Hughes et al., 2014).



**Figura 16.** Gráfica de caja de la coordenada  $L^*$  en los diferentes tratamientos.

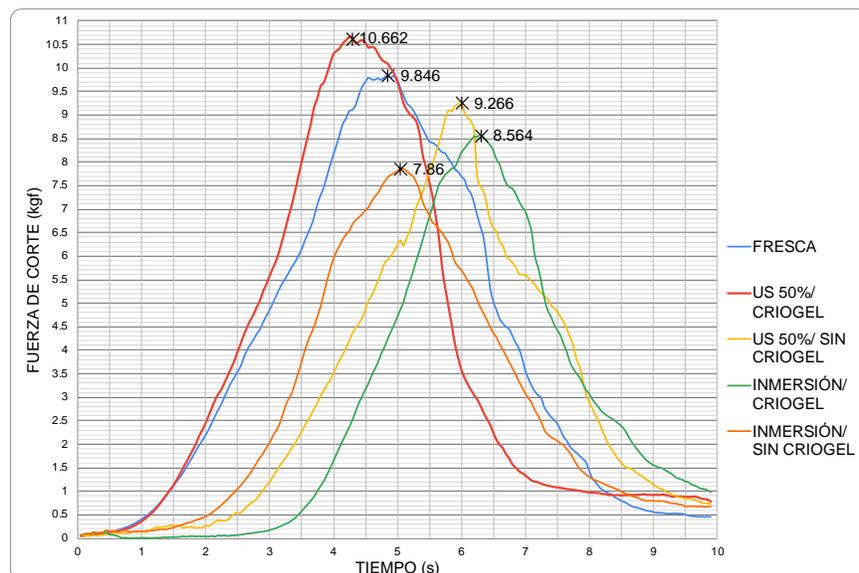
En las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  se observan diferencias que se relacionan principalmente con la cantidad y el estado *redox* del grupo *hemo* de la mioglobina, donde, la tasa de oxidación del pigmento aumenta, ya que al incrementar la temperatura se acelera las reacciones de oxidoreducción de los pigmentos musculares, contribuyendo así a la mayor decoloración de la carne, por lo tanto, el color será menos estable que en la fresca. Sin embargo, se ha demostrado que los cambios más relevantes en la carne ocurren en la luminosidad, en lugar de otros atributos de color como el rojo y amarillo que predominan en la muestra. Es decir, los tres atributos determinan el color de la carne, pero de importancia primordial es la luz que se refleja de vuelta al ojo, lo que determina la percepción (Hernández et al., 2019).

Además, es posible evaluar los cambios de color utilizando la diferencia total en el color ( $\Delta E^*$ ), un parámetro que está relacionado con la capacidad humana para distinguir colores y que no ha recibido la atención necesaria en la investigación del color de la carne. En la industria textil y de

pinturas, se han establecido valores de referencia donde  $\Delta E^* = 1$  (coincidencia de color),  $\Delta E^* = 2$  (diferencia notable) y  $\Delta E^* \geq 3$  (diferencia inaceptable). Por lo que los resultados obtenidos en los distintos tratamientos se considerarían como diferencias significativas, que se deben principalmente a los cambios en la coordenada  $L^*$ . Sin embargo, los umbrales  $\Delta E^*$  dependen de las características de la muestra y no hay datos precisos sobre la diferencia de color para productos cárnicos por lo que las diferencias se podrían considerar como subjetivas (Hernández et al., 2019).

### 3.3.4 Fuerza de corte

Finalmente, se evaluó la fuerza de corte, un ejemplo de esta se puede ver en la Figura 17, en donde se seleccionó una grafica representativa de cada tratamiento y que indica le resistencia al corte, es decir el punto máximo. Las respectivas medias de todos los tratamientos, derivados de dos réplicas con tres repeticiones, se muestran en la Tabla 9. En ella se observa que el punto máximo de corte de la carne fresca es de 9.803 kgf, que concuerda con los datos reportados en la literatura por Coria (2019) y Rees et al. (2002). Chacón (2004) menciona que la dureza de la carne se debe principalmente a las proteínas musculares: del tejido conectivo (colágeno, elastina y reticulina), miofibrilares (actina y miosina) y sarcoplásmicas, así como el contenido graso y la CRA.



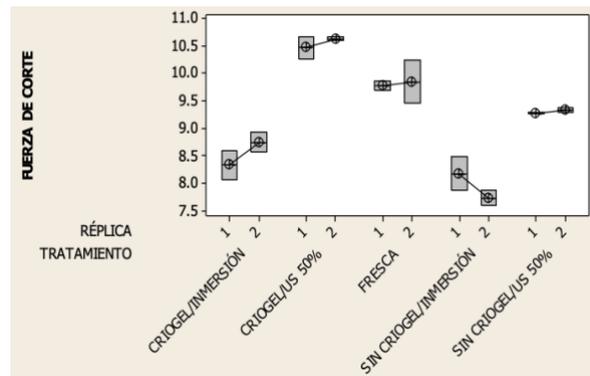
**Figura 17.** Fuerza de corte (kgf) en las muestras de carne.

**Tabla 9.** Valores promedio de parámetros de fuerza de corte de las muestras de carne.

| TRATAMIENTO                                 | RESISTENCIA AL CORTE (kgf) |
|---|----------------------------|
| Carne fresca                                | 9.803 ± 0.335              |
| Carne con criogel descongelada US 50%       | 10.543 ± 0.188             |
| Carne con criogel descongelada en inmersión | 8.535 ± 0.360              |
| Carne sin criogel descongelada US 50%       | 9.301 ± 0.051              |
| Carne sin criogel descongelada en inmersión | 7.948 ± 0.373              |

De igual forma, se demuestra que los tratamientos adicionados con el polímero presentan una mayor resistencia al corte, lo que comprueba que el criogel cumple su función de protector, proporcionando mayor estabilidad a nivel estructural. Así como se evidencia que el fenómeno de cavitación producido por el ultrasonido no alcanza a destruir la matriz cárnica a diferencia de la descongelación por inmersión donde la resistencia al corte es menor.

Estos resultados son consistentes al observar el ANOVA de dos vías representado en la Figura 18. Donde se comprueba que las condiciones de la carne con y sin criogel descongelada en US no muestra diferencias significativas en comparación a la carne fresca. Así como se indica que el uso de criogel no representa un efecto estadísticamente diferente entre las muestras, a comparación del método de descongelación donde existen grandes diferencias significativas. Lo anterior demuestra que el factor principal que influye sobre la resistencia al corte es el método de descongelación.



**Figura 18.** Gráfica de caja de la resistencia al corte (kgf) en los diferentes tratamientos.

Con esto se finaliza el análisis de los resultados obtenidos, cubriendo los objetivos particulares propuestos, por lo que se puede dar paso a las conclusiones de la presente tesis.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

---

De acuerdo con las condiciones en las que se realizaron las pruebas experimentales y, a partir de los resultados obtenidos en cuanto a la transferencia de calor y los parámetros de calidad de la presente investigación, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

La adición del criogel en la carne de cerdo y la descongelación asistida por ultrasonido, mostró un efecto favorable disminuyendo el tiempo y al aumentar la velocidad de descongelación, e influyendo sobre algunos parámetros de calidad.

Al comparar los métodos de descongelación, no se encontraron cambios significativos en el valor de pH. Caso contrario en la adición del criogel, donde existen diferencias entre los tratamientos y se observa que este mantiene un valor próximo al de la carne fresca.

Estos resultados mostraron relación con la CRA, donde, la aplicación de ultrasonido en la descongelación de carne de cerdo presentó una menor cantidad de exudados, en comparación con el método por inmersión, donde se presenta una variación representativa entre los resultados obtenidos.

En términos de parámetros de perfil de color, se observó que en la carne con criogel y descongelada con US se tiene un valor menor en  $\Delta E^*$ . Siendo la coordenada  $L^*$  la que presentó mayores cambios por efecto de los líquidos exudados, y que mostró cambios importantes respecto a los demás tratamientos.

Y en los resultados de la fuerza de corte, la carne con criogel y descongelada con US presentó un comportamiento similar a la carne fresca, mostrando que el efecto principal sobre esta propiedad depende del método de descongelación.

Los atributos de calidad evaluados en las muestras de carne con criogel y descongeladas en US, no muestran diferencias significativas al ser comparados con la carne fresca, indicando que no se generan cambios aparentemente perceptibles para los consumidores.

Finalmente, se puede comprobar que las hipótesis mencionadas en la metodología experimental son acertadas. Donde se menciona que, en carne de cerdo con criogel de almidón waxy, la frecuencia y amplitud del ultrasonido en la descongelación favorecerá la transferencia térmica lo que se verá reflejado en la disminución del tiempo de descongelación, además de mejorar la capacidad de retención de agua y disminuir los cambios en pH, color superficial y resistencia al corte por menor daño en la estructura muscular comparado con la descongelación convencional por inmersión. Logrando en este sentido, encontrar que la combinación de criogel y ultrasonido en el proceso de congelación-descongelación permite aumentar la eficiencia de los procesos, minimizando los cambios en algunos atributos de calidad.

Por lo que, se recomienda dar continuación al trabajo con diferentes variables independientes y niveles de variación con la finalidad de encontrar las condiciones que permitan la optimización del proceso y que mantengan las condiciones de calidad similares a la carne de cerdo fresca. Así como, ampliar el estudio con otros métodos de descongelación, como podrían ser los métodos tradicionales de refrigeración o microondas con la finalidad de encontrar no sólo condiciones de descongelación para su utilización en la industria cárnica si no también para su uso doméstico.

## Referencias Bibliográficas

---

AMAYA, J. (2019). Estudio de la dosificación del almidón extraído del banano en un polímero de tipo termoplástico. *Revista Colombiana de Química*. 48, 43-51. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n1.74469>

AMERICAN MEAT SCIENCE ASSOCIATION [AMSA] (2012). Meat Color Measurement Guidelines. Illinois, USA.

AMERICAN MEAT SCIENCE ASSOCIATION [AMSA] (2016). Research guidelines for cookery, sensory evaluation, and instrumental tenderness measurements of meat. Illinois, USA.

CANÉQUE, V y Sañudo, C. (2005). Estandarización de las metodologías para evaluar la calidad del producto (animal vivo, canal, carne y grasa en los rumiantes). *MICYTINIA: Ganadera*; 3, 216-225.

CHACÓN, A. (2004). Meat tenderness: Physical and biochemical facts related to agricultural and industrial process. *Revista Agronomía Mesoamericana* 15 (2), 225- 243. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v15i2.11918>

CHENG, H., Song, S. y Kim, G. (2021). Frozen/thawed meat quality associated with muscle fiber characteristics of porcine longissimus thoracis et lumborum, psoas major, semimembranosus, and semitendinosus muscles. *Scientific Reports*. 11 (13354). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92908-3>

CORIA, J., Méndez, A., Meléndez, R., Rosas M. y Arjona J. (2018). Thermal, Structural, and Rheological Characterization of Waxy Starch as a Cryogel for Its Application in Food Processing. *Polymers*, 10 (359), 1-13. <https://doi.org/10.3390/polym10040359>

CORIA, J. (2019). Aplicación de criogeles para el control del crecimiento de cristales durante la congelación de carne de cerdo. [Tesis] Universidad Nacional Autónoma de México.

CORIA, J., Meléndez, R., Méndez, A., y Arjona, J. (2021). Changes in myoglobin content in pork Longissimus thoracis muscle during freezing storage. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11(3), 651-668. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i3.5214>

CORN REFINERS ASSOCIATION (2006). Corn Starch. Obtenido de: <https://corn.org/wp-content/uploads/2009/12/Starch2006.pdf>

CRUZ, P., Medina, V. y Velasco Y. (2006). Evaluación de diferentes crioprotectores para la crioconservación de espermatozoides de Yamú (*Brycon amazonicus*). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 19 (2), 152-159.

DANG, D., Bastarrachea, L., Martini, S. y Matarneh, S. (2021). Crystallization Behavior and Quality of Frozen Meat. *Foods*, 10 (2707). <https://doi.org/10.3390/foods10112707>

DE MICHELIS, A. (2015). Congelación de frutas, hortalizas, hongos, carnes y masas: procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). p.p. 6-15

DELGADO, J. (2011). Aplicación del ultrasonido en la industria de los alimentos. *Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales*. 6,141-152. <https://doi.org/10.22490/25394088.1098>

EUROPEAN COMMISSION (2011). Q-PORKCHAINS: Fundamentals of Water Holding Capacity (WHC) of Meat. University of Copenhagen. Obtenido de: [http://qpc.adm.slu.se/6\\_Fundamentals\\_of\\_WHC/page\\_10.htm](http://qpc.adm.slu.se/6_Fundamentals_of_WHC/page_10.htm)

EVANS, J. (2008). Frozen food science and technology. *Wiley Online Library*. p. 124-150

FAO (2015). Composición de la carne. Obtenido de: [https://www.fao.org/ag/againfo/themes/es/meat/backgr\\_composition.html](https://www.fao.org/ag/againfo/themes/es/meat/backgr_composition.html)

FUENTES, E. (2017). Estudio del efecto del diazóxido en los niveles de calcio intracelular en miocitos cardiacos de ratas adultas. [Tesis] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

GUO, Z., Ge, X., Yang, L., Ma, G., Ma, J., Yu, Q. y Han L. (2021). Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure. *Ultrasonics sonochemistry*, 70 (105345). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105345>

- HERNÁNDEZ, B., Sáenz C., Diñeiro J. y Alberdi C. (2019). CIELAB color paths during meat shelf life. *Meat Science*, 157 (107889). <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107889>
- HORCADA, A. y Polvillo, O. (2010). La producción de carne en Andalucía. Sevilla: Junta de Andalucía, Servicio de Publicaciones y Divulgación. p.113-139.
- HUGHES, J., Oiseth, S., Purslow, P. y Warner, R. (2014). A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science*, 98 (3), 520-532. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.022>
- HUI, Y., Aalhus, J., Cocolin, I., Guerrero-Legarreta, I., Nollet, L., Purchas, R., Schilling, M., Stanfield, P., y Xiong, Y. (2012). Handbook of meat and meat processing. *CRC Press/Taylor & Francis Group*.
- INGAVLE, G., Baillie, L., Zheng, Y., Lis, E., Savina, I., Howell, C., Mikhalovsky, S. y Sandeman, S. (2015). Affinity binding of antibodies to supermacroporous cryogel adsorbents with immobilized protein A for removal of anthrax toxin protective antigen. *Biomaterials*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.01.039>
- JAMES, C. y James, S. (2010). Freezing/Thawing. En F. Toldrá. (Ed.) *Handbook of Meat Processing*. (p.p. 105-124). <https://doi.org/10.1002/9780813820897.ch5>
- JANSEN, M. (2001). Determination of meat pH – temperature relationship using ISFET and glass electrode instruments, *Meat Science*, 58 (2), 145-150. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(00\)00142-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00142-X)
- KIM, K., Shim, J., Yoo, S., Min, S., Lee, S., Jo, Y. y Choi, M. (2015). Effects of various freezing and thawing techniques on pork quality in ready-to-eat meals. *African Journal of Food Science*, 9 (11), 525-533. <https://doi.org/10.5897/AJFS2015.1358>
- LEYGONIE, C., Britz, T. y Hoffman, L. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*. 91 (2), 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013>
- LIQING, Q., Min, Z., Bimal, C. y Bhesh, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68 (105230). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230>

MARTÍNEZ, L. (2007). Obtención y caracterización de almidones de malanga, arroz y maíz ceroso modificados por extrusión termoplástica para su uso como encapsulantes de aceite esencial de naranja. [Tesis] Universidad Veracruzana.

MASON, T., Riera, E., Vercet, A. y Lopez, P. (2005). Application of Ultrasound. En D. Sun (Ed.) *Emerging Technologies for Food Processing*. (p.p. 323-351). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012676757-5/50015-3>

MORALES, A. y Martínez, F. (2019). El descongelado por ultrasonido y su evaluación en las propiedades fisicoquímicas en carne de vacuno en el músculo *Semispinalis capitis*. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 657-650. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/7/91.pdf>

MORÓN, O. y Zamorano, L. (2004). Pérdida por goteo en carne cruda de diferentes tipos de animales. *Revista Científica*. 14 (1).

<https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/cientifica/article/view/15024>

NOM-194-SSA1-2004 (2004). NORMA Oficial Mexicana. 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.

ONEGA, M. (2003). Evaluación de la calidad de carnes frescas: aplicación de técnicas analíticas, instrumentales y sensoriales. [Tesis]. Departamento de nutrición y bromatología III de la Facultad de veterinaria, Universidad Complutense de Madrid.

PHAM, T. (2008). Advances In Food Freezing/Thawing/Freeze Concentration Modelling and Techniques. *Japan Journal of Food Engineering*. 9, 21-32.

<https://doi.org/10.11301/jsfe2000.9.21>

PÉREZ, C., Figueroa, F. y Barreras, A. (2005). Effects of Freezing Temperature and Defrosting Method on Pork Quality Characteristics. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 4 (12), 976-979. <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=javaa.2005.976.979>

REES, M., Trout, G. y Warner, R. (2002). Tenderness of pork m. longissimus thoracis et lumborum after accelerated boning. Part I. Effect of temperature conditioning. *Meat Science*, 61(2), 205-214. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00188-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00188-7)

ROBLES, E y Ochoa,A. (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13 (2), 109-122. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81325441002>

STADNIK, J., Dolatowski, Z. y Baranowska, H., (2008). Effect of ultrasound treatment on water holding properties and microstructure of beef (m. semimembranosus) during ageing. *LWT- Food Science and Technology*, 41 (10), 2151-2158. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.12.003>

VILLARINO, A. (2004). Carne de cerdo y alimentación saludable. Obtenido de: <https://www.icvillar.es/salud/salud5.pdf>

WALSTRA, P. (2002). *Physical Chemistry of Foods*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203910436>

WANG, P. y Xu, X. (2018). Modified Starches and the Stability of Frozen Foods. En M. Sjöo y L. Nilsson (Ed.) *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Starch in Food* (2ª ed., p.p. 581-593). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00014-7>

WARNER, R. (2017). The Eating Quality of Meat—Water-Holding Capacity and Juiciness. En. F. Toldrá (Ed.) *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Lawrie's Meat Science* (8ª ed., p.p. 419-459), Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100694-8.00014-5>

WEBSTER, D. (2003). pH – Principles and measurement. En B. Caballero (Ed.) *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (2ª ed., p.p. 4501-4507.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00913-5>

WELTI J., Gómez O., Vergara F. y Maris S. (2005). Aplicaciones de ingeniería y fenómenos de transporte al estudio de la transferencia convectiva de calor en alimentos envasados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4 (1), 89-106.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62040108>

WESTPHALEN, A., Briggs, J., Lonergan, S. (2005). Influence of pH on rheological properties of porcine myofibrillar protein during heat induced gelation. *Meat Science*. 70 (2): 293-299.  
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.01.015>

ZHENG, L. (2006). Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17 (1), 16-23.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.010>

ZONGLIN G., Xiangzhen G., Lihua Y., Guoyuan M, Jibing M., Qun-li Y., Ling H. (2021). Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105345>