



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN**

**Efecto de la congelación y descongelación  
como pretratamiento en el salado por ósmosis  
de carne de cerdo (*Longissimus thoracis*).**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A:**

**IVÁN HAZEL BELLO CORTÉS**

**ASESOR : DRA. ROSALÍA MELÉNDEZ PÉREZ**

**CUAUTILÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



**AGRADECIMIENTO A PROYECTOS  
UNAM-DGAPA:**

**PAPIIT IT 201417**

**PAPIIT IT 201220**

**PIAPI 1820**

## **Dedicatorias**

A mis padres, porque siempre buscan la manera de hacerme feliz, creen en mi todo el tiempo, no hay día que no sienta su apoyo, ellos me demuestran que están orgullosos de mi y siempre están ahí para sostenerme; incluso cuando estuve a punto de rendirme, buscaron ayuda y me motivaron a continuar. Para mi ambos son un gran ejemplo que seguir y sin ellos nada de lo que soy sería posible.

A Óscar, por las risas, los viajes, las peleas y la vida juntos; eres mi hermano y eres lo que más quiero en esta vida, al final solo nos tenemos el uno al otro y no necesito más.

Andrés, Arelhi, Claudia, Paulina, Scarlett, Tania y Umbelina: ustedes se convirtieron en mi familia, juntos hicieron que la universidad fuera la mejor etapa de mi vida. Vivimos cosas buenas, malas, reímos, lloramos, nos apoyamos, y por eso ahora tenemos esa gran hermandad llena de amor que ya traspasó fronteras y que seguramente seguirá a través de los años.

A Janet y Gabriela, que han sido mis compañeras de vida, las personas que siempre han estado ahí, que me conocen mejor que nadie y con quienes tengo una amistad que ha superado los años y los diferentes caminos que hemos tomado.

A Silia, que se volvió parte de mi familia y ahora es de las personas que mas quiero, con la que he compartido momentos entrañables y una de las mejores personas que conozco.

A mi roomie Nora, con la que viví varios años de mi vida y tantos momentos que nos hicieron madurar juntos. Una gran mujer llena de historias, con la que se generó una gran confianza, cariño y amistad, ella hizo de nuestro departamento de universitarios un hogar.

Ana Lilia, mi babys, la mas antigua de mis amigas, la que siempre tiene una palabra de aliento, un consejo, una broma o cruza toda la ciudad para saber que estás bien, es la persona a la que puedes dejar de ver, pero cuando te reencuentras con ella es como si no hubiera pasado el tiempo.

A la Dra. Rosalía Meléndez por no dejar de creer en mi, por su cariño y confianza, por las largas pláticas donde compartía su conocimiento académico y vivencial conmigo, por motivarme a seguir adelante y por ser la gran persona que considero que es.

A la Dra. Marta Rosas por apoyarme en el inicio de este proyecto, por siempre estar en la mejor disposición para que la investigación saliera adelante, por enseñarme y asesorarme, por las conversaciones, risas y regaños, así como por la buena vibra que siempre la acompaña.

A los Doctores José Luis Arjona y Jonathan Coria por compartir conmigo su experiencia y conocimiento, por ayudarme a crecer y ser mejor, por su apoyo y por su gran dedicación como investigadores y académicos.

A la Dra. Hanae Beltrán por ayudarme a ver la luz al final del camino, por darme las herramientas para recuperar la confianza en mi y seguir adelante, y por todo lo que me ayudó.

Hoy cierro un ciclo que para mi significa más que obtener el título como ingeniero y no tengo más que agradecimiento para cada uno de ustedes por haber estado a mi lado durante este proceso.

Con cariño, admiración y respeto.

Iván Bello

<b>Índice</b>	
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Deshidratación osmótica</b>	<b>4</b>
a) Vacío	10
b) Campo eléctrico pulsado	10
c) Congelación y descongelación	11
1.1.1 Difusión en la deshidratación osmótica	11
1.1.1.1 Soluciones matemáticas a la segunda ley de Fick	12
a) Placa plana infinita	13
b) Paralelepípedo rectangular finito	14
c) Cilindro infinito	15
1.1.1.2 Coeficiente de difusión	16
<b>1.2 Carne</b>	<b>16</b>
1.2.1 Composición	20
<b>1.3 Métodos de conservación de carne por frío</b>	<b>24</b>
1.3.1 Refrigeración	25
1.3.2 Congelación	25
1.3.2.1 Descongelación	30
<b>1.4 Deshidratación osmótica de la carne</b>	<b>33</b>
1.4.1 Efecto de la sal en la carne	35
<b>2. Metodología Experimental</b>	<b>37</b>
<b>2.1 Objetivo General</b>	<b>38</b>
<b>2.2 Objetivos Particulares</b>	<b>38</b>
<b>2.3 Diagrama Experimental</b>	<b>40</b>
<b>2.4 Actividades Preliminares</b>	<b>41</b>
2.4.1 Caracterización de la materia prima	41
2.4.1.1 Humedad	41
2.4.1.2 Contenido de Sal	42
<b>2.5 Objetivo Particular 1</b>	<b>42</b>
2.5.1 Exudado	43
<b>2.6 Objetivo Particular 2</b>	<b>43</b>
2.6.1 Cinética de Deshidratación	44

2.6.2 Coeficiente de Difusión	45
<b>2.7 Análisis Estadístico</b>	<b>46</b>
<b>3. Resultados</b>	<b>48</b>
<b>3.1 Actividades Preliminares</b>	<b>49</b>
3.1.1 Caracterización de la Materia Prima	49
<b>3.2 Objetivo Particular 1</b>	<b>49</b>
3.2.1 Exudado	49
<b>3.3 Objetivo Particular 2</b>	<b>54</b>
3.3.1 Pérdida de Agua	54
3.3.2 Coeficiente de difusión para NaCl	62
3.3.3 Ganancia de Solutos	66
a) Espesor	68
b) Tiempo	69
c) Concentración	70
d) Método de Congelación	72
<b>Conclusiones</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química de la carne	20
Tabla 2. Variables y sus niveles	47
Tabla 3. Corridas experimentales	47
Tabla 4. Porcentaje de exudado y humedades alcanzadas en el proceso osmótico, descongelación rápida, 15% NaCl	58
Tabla 5. Porcentaje de exudado y humedades alcanzadas en el proceso osmótico, descongelación rápida, 20% NaCl	60
Tabla 6. Diferencia entre ganancia de solutos a los dos niveles de concentración	71

## Índice de Figuras

Figura 1. Proceso osmótico	5
Figura 2. Estructura de la carne	17
Figura 3. Sistema actina-miosina	19
Figura 4. Curva de congelación	27
Figura 5. Carne de salmón, <i>pre-rigor</i> , <i>post-rigor</i> , congelada y descongelada	28
Figura 6. Daño estructural causado durante la congelación	29
Figura 7. Exudado en la carne	31
Figura 8. Arreglo ortogonal $I_2(5)^{16}$	46
Figura 9. Gráfica de medias para exudados según el método Taguchi	49
Figura 10. Porcentaje de exudado	50
Figura 11. Efecto de la velocidad de congelación en la producción de exudado	51
Figura 12. Porcentaje de exudado: comparación de exudado, variando la velocidad de descongelación, con el método de congelación constante	52

Figura 13. Producción de exudado como función del tiempo de descongelación	53
Figura 14. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 15% de carne descongelada en refrigeración	55
Figura 15. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada en refrigeración	56
Figura 16. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 15% de carne descongelada a temperatura ambiente	57
Figura 17. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada a temperatura ambiente	59
Figura 18. % humedad durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada a temperatura ambiente	61
Figura 19. Gramos de agua durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada a temperatura ambiente	61
Figura 20. Gráfica de medias para coeficiente de difusión de NaCl	62
Figura 21. Coeficientes de difusión para NaCl durante la deshidratación osmótica de carne con espesor de 1.0 cm, en un tiempo definido y pretratamiento de congelación-descongelación, con todas las variables en dos niveles	63
Figura 22. Coeficientes de difusión para NaCl durante la deshidratación osmótica de carne con espesor de 0.5 cm, en un tiempo definido y pretratamiento de congelación-descongelación, con todas las variables en dos niveles	64
Figura 23. Ganancia de solutos con congelación y concentración constantes	66
Figura 24. Ganancia de solutos, espesor y tiempo constantes	67
Figura 25. Comparación entre curvas para determinar el coeficiente de difusión y curva de ganancia de solutos	69

## Introducción

El almacenamiento y conservación de los alimentos es un área importante de investigación para los ingenieros en alimentos, de cuyos temas destacan el secado y los métodos de conservación por frío; los cuales, tienen el propósito de estudiar como reducir la actividad de agua en los mismos, evitando así el crecimiento de microorganismos.

En la industria cárnica es una práctica común que el producto sea almacenado y transportado a temperaturas de congelación, sin embargo, no siempre se respeta la cadena de frío de éste, la importancia al método de congelación y, tampoco la temperatura a la que es descongelado. A pesar de ello, estas variables son factores importantes que tienen efecto sobre el comportamiento que tendrá la materia prima durante su procesamiento.

De la velocidad de congelación depende el tamaño de cristal de hielo que se formará durante la solidificación del agua dentro de la carne y, en consecuencia, si este causará o no un daño estructural en ésta, que, junto con la velocidad de descongelación, son responsables de la cantidad de exudado que se pueda formar al finalizar la misma y, por lo tanto, de la humedad del alimento.

Por otro lado, la deshidratación osmótica es una alternativa al secado que permite al alimento liberar agua sin dañar su estructura, contrario a un secado por convección en el que las altas temperaturas provocan cambios físicos y químicos en el producto. En carne, el proceso osmótico puede ser utilizado para aumentar o disminuir la cantidad de agua dentro la misma y también, para introducir solutos que le den sabor u otras características deseadas en ésta; lo anterior es consecuencia de las variables del proceso como la concentración y la temperatura.

El daño estructural y la pérdida de humedad que pueden causar la congelación y la descongelación, pueden modificar el comportamiento de la carne durante el proceso osmótico, por lo que surge el interés de estudiar la transferencia de masa durante el mismo, a partir de la difusión y la cinética de deshidratación, por medio de los factores que influyen sobre los coeficientes de difusión, la ganancia de solutos y la pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de carne de cerdo.

## Resumen

En esta investigación se analizó cómo la deshidratación osmótica (DO) de carne produce compresión y relajación de las fibras musculares promoviendo el flujo de agua, así como, un mecanismo difusional por el gradiente de actividad acuosa entre la solución y ésta. Como pretratamientos se utilizaron la congelación y la descongelación; durante la congelación se producen cristales extracelulares que dañan la estructura, desnaturalizando las proteínas y disminuyendo la retención de agua durante la descongelación. Sin embargo, es práctica común que el producto se encuentre congelado antes de cualquier proceso de transformación.

El objetivo de este trabajo fue el de evaluar la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica (DO) en carne previamente congelada en cámara ( $-25^{\circ}\text{C}$ ) y en nitrógeno líquido ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) y descongelada en cámara ( $4^{\circ}\text{C}$ ) y a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ). Se utilizaron soluciones al 15 y 20% de NaCl a  $4^{\circ}\text{C}$  para deshidratar cubos de carne de  $1\text{ cm}^3$  y placas de  $1\text{ cm}^2$  por  $0.5\text{ cm}$  de espesor durante 1 y 2 h; se tomaron muestras a diferentes tiempos para determinar su peso y humedad. El contenido de sal en las muestras a cada tiempo se obtuvo con un refractómetro de salinidad.

A partir de la cinética de deshidratación se obtuvieron la ganancia de agua, de solutos y el coeficiente de difusión de NaCl mediante la solución analítica de la segunda ley de Fick. Los resultados obtenidos muestran que el efecto de la congelación con cámara de la carne como pretratamiento a la DO, tiene una influencia positiva en la ganancia de solutos y el coeficiente de difusión, mientras que la descongelación a temperatura ambiente provoca una ganancia de agua en la carne cuando la concentración de la solución hipertónica es del 15%.

# **1. Antecedentes**

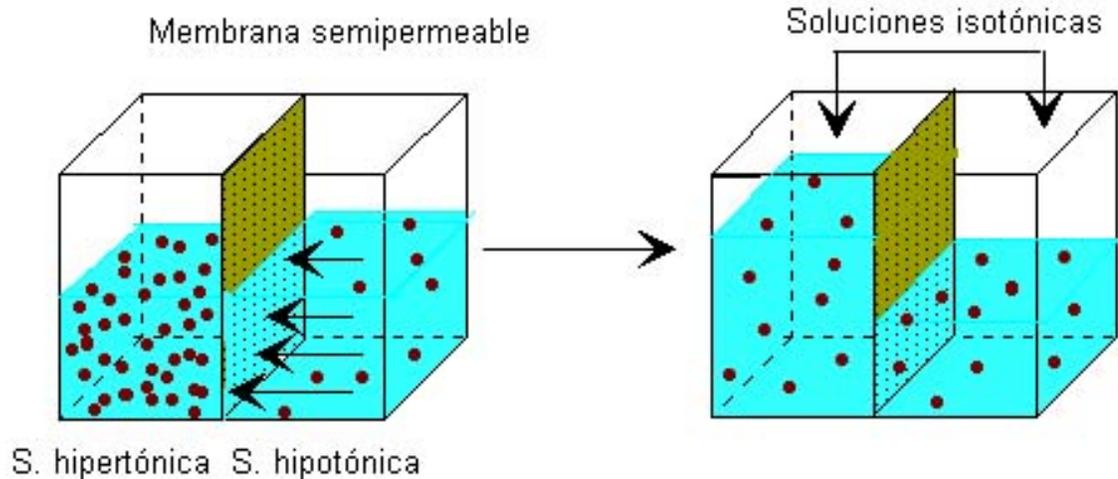
## 1.1 Deshidratación osmótica

Uno de los aspectos relevantes para iniciar los antecedentes teóricos del proyecto, fue definir su operación principal donde se llevó a cabo la transferencia de masa; el objeto de análisis del proyecto es la deshidratación osmótica, el cuál, se utiliza normalmente para llegar a una humedad intermedia en frutas, vegetales, carne, pescado y consiste en la inmersión del alimento en una solución hipertónica concentrada, que contiene al menos un sólido soluble conocido como agente osmótico, el mismo puede ser una sal, algún azúcar, fosfatos o ácidos (Dalla Rosa y Giroux, 2001; Gekas y col., 1998; Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2008).

El agente osmótico debe tener una gran capacidad de captación de agua para que junto con una alta concentración, exista poca agua libre en la solución, lo que resulta en una baja actividad de agua, y así, se logre un desequilibrio en el sistema que se forma entre el alimento, que tiene un alta actividad de agua y el medio acuoso al que es introducido (Gekas y col., 1998; Li y Ramaswamy, 2005; Rastogi y col., 2002; Volpato y col., 2007).

El desequilibrio, es la fuerza impulsora para la transferencia de masa dentro de la deshidratación osmótica y al sumergir el alimento en la solución que tiene concentraciones de humedad y solutos diferentes, el sistema busca que éstas sean iguales, entonces, ahí es donde comienza la difusión. A través de la membrana semipermeable de las células del alimento, se dan dos flujos de manera simultanea; uno de líquido que va hacia el medio acuoso y otro de solutos que va hacia el alimento, logrando así la deshidratación (Dalla Rosa y Giroux, 2001; Li y Ramaswamy, 2005; Rastogi y col., 2002).

Por ejemplo, si se ponen dos soluciones del mismo soluto a diferentes concentraciones que están separadas por una membrana semipermeable, comienza una transmisión a través de los flujos antes descritos y a lo largo del tiempo, comenzarían a lograr un equilibrio hasta llegar a ser isotónicas.



**Figura 1. Proceso osmótico** (Hernandez Gil, 2007)

En la Figura 1 se presenta el ejemplo antes mencionado, del lado izquierdo, se ejemplifican las dos soluciones a diferentes concentraciones separadas por la membrana semipermeable. La flecha en el centro representa el proceso en el que el sistema genera un equilibrio, con el flujo de agua y de solutos que van del lugar más concentrado al menos concentrado según es el caso. Y la parte derecha de la figura muestra las dos soluciones con la misma concentración.

La efectividad de la deshidratación osmótica como operación depende de diferentes variables que son controlables y que son descritas por autores como: Della Rocca (2010), Kowalska y col. (2008), Li y Ramaswamy (2005), Rastogi y col. (2002), Schmidt y col. (2009), Volpato y col. (2007); y se describen a continuación:

a) Características del alimento.

La principal característica de cualquier alimento es su composición química, está compuesto normalmente de proteínas, carbohidratos, lípidos y minerales. De las concentraciones de cada uno de estos elementos, depende la cantidad de agua que está unida al alimento y la fuerza de estas uniones, por ello, define qué tan fácil se puede desprender el agua de éste y con que facilidad los sólidos de la solución hipertónica pueden hacer nuevos enlaces con el mismo, al ser transportados hacia el interior.

Otro factor importante es la estructura física, dependiendo de su porosidad, de la dirección que tienen las fibras de éste, e incluso, del tipo de piel que tenga, sea fruta, vegetal o carne, va a ser la facilidad con la que el agua y los solutos, puedan transportarse dentro de éste, la estructura física puede favorecer o dificultar el transporte. Por esta razón, conocer la estructura también es importante, para que, en caso de necesitar hacer cortes, éstos se hagan de la manera correcta, ya sea en el sentido de las fibras o, en el lado que exista más porosidad, para así, favorecer la entrada de solutos y la salida de agua durante la deshidratación osmótica.

b) Naturaleza de los solutos en la solución hipertónica.

En la deshidratación osmótica los solutos que se utilizan para crear la solución deben ser elegidos dependiendo del resultado que se quiera obtener y tomando en cuenta el material a deshidratar, para no alterar las características sensoriales del mismo, por ejemplo, con frutas, se utilizan normalmente azúcares o ácidos, mientras que, con carnes se utilizan sales o fosfatos mezclados con especias, para darle un valor agregado al producto.

Además, también deben considerarse las características químicas del soluto, como su peso molecular y su polaridad, ya que de éstos depende la capacidad de enlaces que va a poder hacer con el agua, y así saber qué tanto va a disminuir la actividad de la misma en la solución, lo que repercute directamente en el desequilibrio que se generará en el sistema y así, a su vez, tanto en la velocidad y porcentaje de agua que se retirará del alimento, como en la cantidad de solutos que entrarán al mismo y los enlaces que podrán hacer con el alimento para quedarse dentro de él.

c) Concentración de los solutos en la solución.

Una vez que ya elegimos el soluto correcto para nuestro proceso, es necesario saber la cantidad que vamos a usar de éste. Para lograr una concentración adecuada de la solución hipertónica se debe lograr un valor alto en la solución, ya que mientras mayor sea, menor será el agua que quede libre, y, por lo tanto, la actividad de agua de ésta será menor también.

Al producir un desequilibrio mayor y aumentar el gradiente de concentración entre la solución y el alimento, se provoca una mayor velocidad en la transferencia de agua y de solutos en el sistema, sin embargo, se debe tener cuidado de que, con la concentración alta, no se genere una capa de solutos alrededor de éste, que, en lugar de facilitar, dificulte la transferencia de elementos al obstruir la permeabilidad del alimento en la capa externa del mismo. También, se debe cuidar que la concentración de soluto no genere características organolépticas indeseables en el producto final, como un dulzor o un salado excesivo.

d) Relación masa de solución/masa del producto.

Como se explicó en la Figura 1, el sistema, al querer llegar a un equilibrio, extrae agua de la parte menos concentrada, para trasladarla a la de mayor concentración, creando así, una dilución de ésta, para lograr concentraciones iguales de los dos lados. Esto, es indeseable en el proceso de deshidratación osmótica, lo que se pretende, es que el gradiente de concentración sea continuo, para que la deshidratación mantenga la misma velocidad durante todo el proceso, y se puede lograr de dos maneras:

La primera, es mantener una concentración constante en la solución hipertónica con una relación mínima de 1:20 masa/volumen durante la deshidratación, esto quiere decir que, por cada parte de muestra que haya, debe haber al menos 20 partes de solución hipertónica, para garantizar que, aunque salga agua con la intención de diluirla, no afectará a la concentración inicial de la misma ya que su cantidad es mucho mayor.

La segunda es que, al asegurar que la concentración de la solución se mantenga constante durante el proceso con la relación mínima de 1:20, también, se debe asegurar que ésta sea constante en todos los puntos de la misma y no sea más baja mientras esté más cerca al objeto inmerso debido al agua que libera, lo cuál, se logra al agitar la solución para mantener la concentración homogénea.

e) Tiempo de inmersión.

La operación principal de la deshidratación osmótica como ya se dijo, es la inmersión de un alimento en una solución hipertónica, por tanto, el tiempo de inmersión resulta ser decisivo en la operación cuando todas las variables anteriores están controladas, de él, depende la cantidad de agua que será removida y los solutos que serán introducidos.

La difusión, es el fenómeno de transporte que describe esta operación y que describiremos más adelante, como un proceso no estacionario, por eso, el tiempo es una variable importante, hasta antes de alcanzar el equilibrio, el tiempo recomendado de inmersión va desde 1 hora, hasta las 18, dependiendo de las características finales que deseables en el producto.

Ahora bien, la deshidratación osmótica, al ser una operación unitaria debe tener parámetros para su control, de acuerdo con Ade-Omowaye y col. (2003), para estandarizar el proceso, se definen los valores de las variables involucradas por medio de la cinética de la operación, ésta se obtiene al tomar muestras del alimento inmerso en la solución hipertónica a través del tiempo. Se le realizan mediciones de peso, contenido de humedad y solutos, para obtener valores de ganancia de solutos, pérdida de agua y reducción de peso (SG, WL y WR) por sus siglas en inglés. Las ecuaciones para los parámetros osmóticos antes descritos fueron publicadas por Kayman-Ertekin y Sultanoglu, (2000).

Pérdida de agua:

$$\%WL = \frac{M_0 X_0^w - M_t x_t^w}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

Ganancia de sólidos:

$$\%SG = \frac{M_t X_t^{ts} - M_0 x_0^{ts}}{M_0} \times 100 \quad (2)$$

Reducción de peso:

$$\%WR = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

$M_0$ =Masa inicial de la muestra (g).

$M_t$ = Masa de la muestra al tiempo t (g).

$X_0^w$ =Concentración de agua inicial de la muestra.

$X_t^w$ = Concentración de agua en la muestra al tiempo t.

$X_0^{ts}$ =Concentración inicial de solidos totales.

$X_t^{ts}$ = Concentración de solidos totales al tiempo t.

Al graficar estos valores contra el tiempo se obtienen las curvas de la transferencia de masa a través del proceso, y así, se pueden definir las mejores condiciones de operación según las características finales del producto deseadas.

En la deshidratación osmótica puede utilizarse también como un pretratamiento con otros procesos, como la congelación, liofilización y el secado. Esto disminuye el daño que se pueda generar en el alimento como consecuencia del proceso principal y puede mantener las propiedades nutrimentales, estructurales, sensoriales y funcionales (Ade-Omowaye y col., 2003; Rastogi y col., 2002).

Lo anterior se debe a que la humedad es retirada en condiciones poco agresivas para la estructura y disminuye los tiempos de proceso de las otras operaciones que si afectan al alimento, dando como resultado, un producto con tejidos más similares al inicial que los que se pudieron haber obtenido, si solo se hubiera usado el proceso principal, y con un gasto energético menor, resultando también más económico a pesar de que el tiempo invertido debe ser mayor (Della Rocca, 2010; Schmidt, Carciofi, y Laurindo, 2008).

De acuerdo con Rastogi y col. (2002), la ósmosis también se ve beneficiada de pretratamientos y la operación se da a partir de una membrana semipermeable presente en las células de materiales biológicos, que puede representar una resistencia al proceso. En la actualidad se utilizan diferentes procesos para aumentar la permeabilidad de la membrana celular del alimento, y así, favorecer a la transferencia de masa durante la inmersión.

El objetivo de los pretratamientos es causar un daño a la membrana celular, que permita aumentar su permeabilidad, y así, aumentar la velocidad de transferencia de agua y de solutos en el producto. Los pretratamientos a la deshidratación osmótica más utilizados dentro de la industria cárnica son: a) vacío y b) pulsos eléctricos, los cuales son descritos por (Rastogi y col., 2002; Sagar y Suresh, 2010).

#### **a) Vacío**

El vacío se define como un espacio con una presión total menor a la atmosférica, así pues, mientras menor sea la presión, mayor vacío existirá. La ausencia de presión causa en la carne una compresión de las fibras, lo que provoca que el aire contenido en los espacios se libere, de modo que, cuando el vacío es retirado, las fibras regresan a su forma normal tomando el aire que le fue retirado. Sin embargo, cuando éste es retirado dentro de un medio osmótico, el alimento absorbe la solución hipertónica como una esponja en lugar del aire, lo que aumenta el área de contacto con la misma, esto resulta en una mayor transferencia de masa y, por lo tanto, una mayor velocidad de difusión.

#### **b) Campo eléctrico pulsado**

Este tratamiento consiste en colocar el alimento entre un set de electrodos que envuelven una cámara de tratamiento, a ésta, se introduce la carne para que le sean suministrados pulsos eléctricos, se genera un daño estructural en el producto que se define como un ablandamiento de tejidos, una pérdida de presión de osmótica y un incremento en la permeabilidad de las células. Entonces al lograr una mayor permeabilidad, se tiene un mejor flujo de la solución osmótica dentro del alimento, lo que aumenta la interacción y favorece a la difusión del agua y los solutos durante el proceso.

## **c) Congelación y descongelación**

Existe información reportada de que existe daño estructural y pérdida de retención de agua durante este pretratamiento, lo que pudiera tener una consecuencia en el proceso osmótico. Taiwo y col. (2001) utilizaron la congelación como pretratamiento en rebanadas de manzana, obteniendo un aumento en la pérdida de agua y ganancia de solutos durante la deshidratación osmótica.

### **1.1.1 Difusión en la deshidratación osmótica**

Sabemos que lo que ocurre durante la deshidratación osmótica se denomina transferencia de masa, sin embargo, el fenómeno de transporte tiene el nombre de difusión. La difusión según Crank (1975), es el proceso mediante el cual la materia se transfiere de un lugar a otro, como resultado de movimientos moleculares aleatorios.

Cuando introducimos un soluto en un solvente, las moléculas del primero se comportan cada una, de manera independiente y a su vez, están en constante colisión con las moléculas del segundo, por lo tanto, cada molécula disuelta se puede mover a veces a zonas de alta concentración, y otras veces, a zonas de baja concentración, esto es el movimiento aleatorio. Debido a este movimiento, se puede calcular la distancia media que recorre el soluto en el solvente a un tiempo determinado, pero no las diferentes direcciones que toman cada una de sus moléculas en ese tiempo.

Al igual que la difusión, el calor por conducción se transfiere por medio de movimientos aleatorios, por lo que, según Crank (1975), Fick realizó una comparación entre estos dos fenómenos de transporte al igualarlos de forma matemática, utilizó la ecuación de transferencia de calor por conducción que derivó Fourier, para definir la transferencia de masa por difusión. La teoría matemática de difusión en sustancias donde no hay transferencia de calor (adiabática), está basada en la siguiente hipótesis: la cantidad de transferencia de una sustancia que se difunde en un lugar determinado es proporcional al gradiente de concentración contenida en el mismo lugar, la cuál, se muestra en la ecuación 4:

$$F = \frac{-DdC}{dx} \quad (4)$$

Donde F transferencia en un lugar determinado, C es la concentración de la sustancia que se difunde, x es la dirección. Ésta es conocida como la primera ley de Fick (Ecuación 4).

Cuando se toma en cuenta que la difusión se da en una sola dirección y que existe un gradiente de concentración solo en el eje x, se obtiene la segunda ley de Fick que se encuentra a continuación.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (5)$$

Esta ley no representa todas las formas de transferencia de masa que tienen lugar en un alimento durante la deshidratación osmótica, sin embargo, permite modelar empíricamente dicha operación, para modelarla, existen varias soluciones analíticas para geometrías y condiciones específicas.

#### **1.1.1.1 Soluciones matemáticas a la segunda ley de Fick**

De acuerdo con Della Rocca (2010), para que el modelo de difusión de Fick sea válido, se deben cumplir con las siguientes consideraciones:

1. Se asume que la solución osmótica tiene una concentración constante; por lo tanto, se requiere una relación masa/volumen de 1:20 por lo menos.
2. Existen soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas, se emplean técnicas numéricas para resolver formas irregulares.
3. Se considera que no hay una dilución de la solución osmótica.
4. Se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa
5. Se desprecia la resistencia a la transferencia de masa externa.

Ahora bien, las soluciones matemáticas para la segunda Ley de Fick (Ecuación 5) para diferentes geometrías, fueron reportadas por Crank (1975) y resueltas por

Della Rocca (2010) y Rastogi y col., (2002), éstas son válidas para la pérdida de agua y la ganancia de solutos.

### a) Placa plana infinita

La siguiente solución a la segunda ley de Fick (Ecuación 5) para una placa infinita que es deshidratada por las dos caras es válida con las siguientes condiciones límite.

$$C = C_0 \text{ cuando } t = 0 \quad C = C_1 \text{ cuando } t > 0 \quad C = C_e \text{ cuando } t = \infty \quad -l < x < +l$$

Cuando la placa es introducida en una solución hipertónica bien agitada de volumen infinito, la ecuación es:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left\{ -D(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t \right\} \quad (6)$$

Donde:

D: coeficiente de difusión efectivo (para agua (Dew) y para soluto (Des)) ( $m^2/s$ ).

$M_t$ : cantidad de sustancia difundida que entra en la placa en el tiempo t.

$M_\infty$ : cantidad de sustancia en el equilibrio.

t: tiempo (s).

l: mitad del espesor (m).

$M_t$  y  $M_\infty$  también se pueden definir como:

Para Dew como:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{H_t - H_0}{H_e - H_0} \quad (7)$$

Para Des como:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{S_t - S_0}{S_e - S_0} \quad (8)$$

Donde:

H: humedad del producto.

S: concentración de sólidos en el producto.

Y, los subíndices 0, t y e se refieren a las condiciones iniciales, a cualquier tiempo t y al equilibrio, respectivamente.

Ahora bien, si la placa es deshidratada en una solución bien agitada con un volumen definido, la solución se modifica a la siguiente.

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha(1 + \alpha)}{1 + \alpha + \alpha^2 q_n^2} \exp \left\{ -D \frac{q_n^2}{l^2} t \right\} \quad (9)$$

Donde:

D: coeficiente de difusión efectivo (para agua (Dew) y para soluto (Des)) (m<sup>2</sup>/s).

$\frac{M_t}{M_\infty}$  : es igual a las ecuaciones 7 y 8.

l: es la mitad del espesor (m).

$\alpha$ : es la proporción que existe entre el volumen de la muestra y el de la solución.

$q_n$ : son las raíces positivas diferentes a cero de la ecuación:

$$\tan q_n = -\alpha q_n \quad (10)$$

### **b) Paralelepípedo rectangular finito**

La solución a la segunda ley de Fick (Ecuación 5) cuando la muestra es un paralelepípedo rectangular de lados 2a, 2b y 2c, resulta en la siguiente ecuación:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp \left[ -Dt q_n \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right) \right] \quad (11)$$

Donde:

D: coeficiente de difusión efectivo (para agua (Dew) y para soluto (Des)) (m<sup>2</sup>/s)

$\frac{M_t}{M_\infty}$  : es igual a las ecuaciones 7 y 8

$C_n$ : es igual a la ecuación:

$$\frac{2\alpha(1 + \alpha)}{1 + \alpha + \alpha^2 q_n^2} \quad (12)$$

Donde:

$q_n$ : son las raíces positivas diferentes a cero de la ecuación 10.

$\alpha$ : es la proporción que existe entre el volumen de la muestra y el de la solución.

### c) Cilindro infinito

Cuando un cilindro se encuentra dentro de una solución bien agitada y de volumen definido, con las siguientes consideraciones.

$$C = C_0 \text{ cuando } t = 0 \quad C = C_1 \text{ cuando } t > 0 \quad C = C_e \text{ cuando } t = \infty$$

La solución a la segunda ley de Fick es:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\alpha(1 + \alpha)}{4 + 4\alpha + \alpha^2 q_n^2} \exp \left\{ -D \frac{q_n^2}{a^2} t \right\} \quad (13)$$

Donde:

$\frac{M_t}{M_\infty}$  : es igual a las ecuaciones 7 y 8.

$\alpha$ : es la proporción que existe entre el volumen de la muestra y el de la solución

$a$ : es el radio del cilindro (m)

$q_n$ : son las raíces positivas diferentes a cero de la ecuación:

$$\alpha q_n J_0(q_n) + 2J_1(q_n) = 0 \quad (14)$$

Donde:

$J_0$ : es la función de Bessel de orden cero

$J_1$ : es la función de Bessel de primer orden

### **1.1.1.2 Coeficiente de difusión**

Las ecuaciones anteriores muestran cómo determinar la diferencia de concentración que existe a través del tiempo en diferentes geometrías, sin embargo, en todas aparece el coeficiente de difusión que expresamos como (D) y que después especificamos que puede ser ( $D_w$ ) o ( $D_s$ ), dependiendo si es para agua o es para solutos.

El coeficiente de difusión es una variable de respuesta que permite inferir como se está llevando a cabo el proceso. Crank (1975), lo define como la velocidad de transferencia de la sustancia que se difunde a través del área de una sección de espacio que divide una gradiente de concentración.

Entonces, el coeficiente de difusión permite saber que facilidad, o dificultad, está teniendo la sustancia estudiada, para viajar a través del espacio, sus unidades son ( $m^2/s$ ) y su magnitud depende de ciertas características en la carne; como su composición química, su porosidad o dirección de las fibras, pH, concentración de la solución hipertónica y la temperatura. Determinar su valor permite como ingenieros estandarizar procesos que involucran la transferencia de masa, como la deshidratación o el marinado (Ade-Omowaye y col., 2003; Dalla Rosa y Giroux, 2001; Gekas y col., 1998; Kowalska, Lenart y Leszczyk, 2008; Rastogi y col., 2002; Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2008; Volpato y col., 2007).

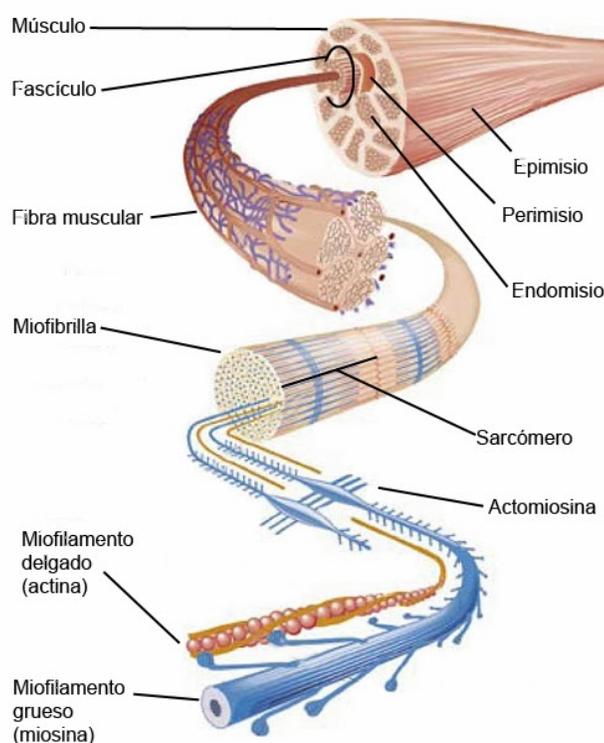
## **1.2 Carne**

La carne, según Amerling (2001), son todas las partes aptas para el consumo humano de animales domésticos de las especies bovina, porcina, ovina, caprina, así como solípedos domésticos. Ésta se compone principalmente de músculo esquelético y en cantidades mucho menores, de tejido conectivo, epitelial y nervioso.

La carne es un alimento muy complejo debido a su estructura y composición, tiene una estrecha relación con la estructura del músculo vivo, el conocimiento de la estructura de la carne es importante para conocer su funcionamiento y la manera

en que puede comportarse frente a algún procesamiento (Hamill y Botinestean, 2016).

Con base en lo dicho por Amerling (2001), Castro-Giráldez y Fito (2010), Hamill y Botinestean (2016) y Huff-Lonergan y Lonergan (2005); la carne está formada por células contráctiles que están compuestas por complejos proteicos contráctiles llamados, proteínas miofibrilares, estos autores son los que describen mejor la estructura de la carne que podemos ver en la Figura 2, debido a lo cual, con base en sus publicaciones, a continuación se hace la descripción de la misma.



**Figura 2. Estructura de la carne** (Lureña, 2013)

El músculo consta de tres capas de tejido conectivo: el epimisio, el perimisio y el endomisio. El primero es la capa externa, consiste una capa gruesa de tejido que protege a todo el músculo, además de convertirse en los tendones que se unen con el hueso; el segundo, rodea a los paquetes de fibras musculares conocidos como fascículos, y finalmente, el tercero es la capa más delgada de tejido que rodea y protege a la membrana celular de la carne.

Ahora bien, la célula en la carne tiene los siguientes componentes:

- El sarcolema es una membrana basal de dos capas que rodea a la célula, también llamada fibra muscular, que se encuentra dentro del endomisio, que a su vez, es una capa reticular formada por finas fibras de colágeno y fosfolípidos que cumple la función de barrera entre los componentes extra e intracelulares.
- El sarcoplasma es una sustancia coloidal compuesta en su mayoría por agua, en el que están suspendidos los organelos, que incluyen, a la mitocondria, lisosomas, los núcleos, el aparato de Golgi y los ribosomas; además de las enzimas, una cantidad mínima de lípidos, glucógeno, proteínas y compuestos nitrogenados no proteicos.

La fibra muscular, contiene varios núcleos distribuidos a lo largo de la misma, por lo que la cantidad depende del largo de la célula, están ubicados inmediatamente debajo del sarcolema y tienen una forma elipsoidal con el eje mayor orientado paralelamente a la longitud de la célula.

Dentro de las células también se encuentran las unidades más importantes estructural y químicamente hablando, se denominan miofibrillas, y se encuentran dentro del sarcoplasma: son bastones cilíndricos largos y finos orientados paralelamente a la fibra muscular.

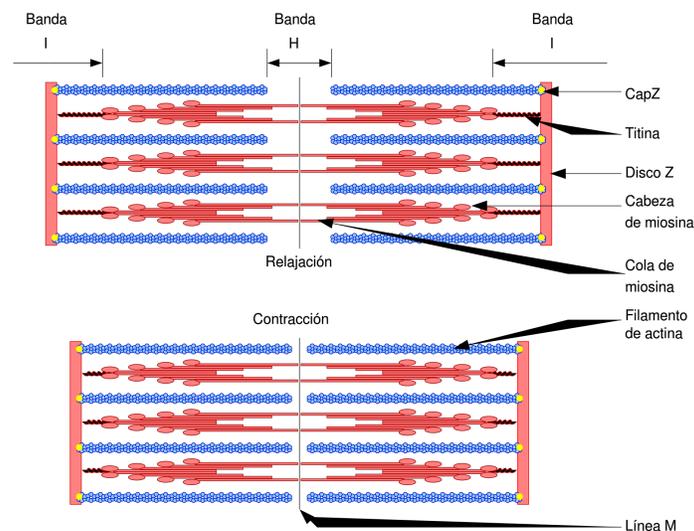
Al imaginar un corte transversal de las miofibrillas, se verían una serie de puntos perfectamente ordenados de dos diferentes tamaños, llamados filamentos. Ahora, si se imagina un corte longitudinal, podremos distinguir que existen dos tipos de filamentos: los gruesos y los delgados, los cuales, se intercalan entre sí a lo largo de toda la miofibrilla y difieren en composición química y en propiedades (Ertbjerg y Puolanne, 2017).

De acuerdo con Hamill y Botinestean (2016) y Ertbjerg y Puolanne (2017), los filamentos gruesos están compuestos en su mayoría (45%) por miosina: proteína estructural de molécula asimétrica que consta de seis unidades de polipéptidos y tiene una estructura alargada en forma de barra que al final tiene un área engrosada,

llamada cabeza. Su región más delgada, llamada cola, consta de dos polipéptidos unidos en una espiral  $\alpha$ -hélice, lo que hace que tenga dos cabezas globulares en un extremo que unen e hidrolizan ATP a ADP + Pi. Cada filamento de miosina está rodeado por seis de actina en los dos extremos de traslape (cada uno de actina tiene 3 de miosina de cerca).

El filamento delgado se compone de dos  $\alpha$ -hélices enrolladas, junto con las proteínas reguladoras tropomiosina y troponina. Como la actina es la proteína con la concentración más alta en filamentos delgados (20%), generalmente se conoce como filamentos de actina. La función de la tropomiosina junto con la troponina es de regular la interacción entre la actina y la miosina durante la contracción.

La estructura que forma los filamentos de miosina y actina en el músculo, como se muestra en la Figura 3, es la responsable de la función de contracción-relajación.



**Figura 3. Sistema actina-miosina (Gelambi, 2019)**

En la Figura 3 se aprecia el ordenamiento de los filamentos, la línea "M" es donde se une miosina con miosina, mientras que la línea "Z" es la unión de actina con actina. Por otro lado, la zona "H" es donde solo encontramos miosina, mientras que en la banda "I" solo tenemos actina, y finalmente, en la banda A es donde se da la unión de actina-miosina y se forma la contracción-relajación.

## 1.2.1 Composición

La otra característica importante por tomar en cuenta en la deshidratación osmótica es la composición química, la cuál, es la responsable de las interacciones moleculares entre el alimento y los agentes externos. Es la responsable de proporcionar energía y funciones fisiológicas, ya sea al alimento o a quien lo consume.

La carne es en su mayoría tejido muscular, Soren y Biswas, (2020) dicen que la mayoría contiene 75% agua, 20% de proteínas y 5% de grasas, carbohidratos y una variedad de vitaminas y minerales; mientras que Amerling (2001) comenta que se compone de un 75.0% de agua, 17.0% de proteínas, 3.5% de sustancias no proteicas solubles y un 3.0% de grasa. Entonces, debemos considerar los factores que pueden tener influencia sobre la composición del alimento: la especie, raza, genética, género, alimentación, edad cronológica y fisiológica, peso, la matanza, el tipo de músculo y el procesamiento *postmortem*.

En la Tabla 1 se muestra la composición química de carne magra de diferentes animales.

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

Carne (g)	Composición Química (%)			
	Agua	Proteína	Grasa	Cenizas
<b>Magra de res</b>	75.0	22.3	1.8	1.2
<b>Magra de cerdo</b>	75.0	22.8	1.2	1.0
<b>Magra de ternera</b>	74.6	22.8	0.8	1.2
<b>Pollo</b>	75.0	22.8	0.9	1.2

Soren y Biswas, (2020).

La manera en que los factores mencionados anteriormente afectan la composición de la carne de cerdo fue publicada por Keenan (2016) y Rosenvold y Andersen (2003) y es descrito a continuación:

La carne de cerdo es más suave que la carne de res o cordero, debido a que su composición de ácidos grasos es mas rica en insaturados, sin embargo, ésta se ve

influenciada directamente por la alimentación del puerco, por lo que su concentración de éstos puede incrementar gradualmente, si éste es alimentado con una dieta rica en los mismos, por ejemplo, harina de pescado o aceites vegetales.

A su vez, este animal tiene un alto contenido proteico y sus aminoácidos son mejor aprovechados por el sistema digestivo humano, que los de la mayoría de las proteínas vegetales, además, es una gran fuente de vitaminas hidrosolubles, pero no tanto con las liposolubles. Sin embargo, como todas las proteínas animales, ésta es rica en vitamina B12, riboflavina y niacina y como fuente de minerales, contiene potasio, fosforo, hierro, zinc, magnesio y manganeso.

En términos de humedad, una condición común relacionada clásicamente con el cerdo es la carne pálida, suave y exudativa, aunque también puede darse en otras especies. Ésta se da cuando el tejido muscular sufre una reducción en el pH hasta 6.0, como resultado de la hidrólisis ATP durante la conversión de músculo a carne que se combina con un incremento de temperatura, lo que causa una desnaturalización de algunas proteínas contráctiles, y, por lo tanto, una pérdida en la capacidad de retención de agua.

Las causas principales son el estrés *ante-mortem*, una mala matanza y factores genéticos. Los autores que mejor describen la composición química de la carne en sus publicaciones son Amerling (2001), Hamill y Botinestean (2016), Soren y Biswas, (2020) y Price y Schweigert (1971).

Cada componente de la composición es importante dentro del procesamiento de la carne, ya que, acompañados de la estructura son los responsables de su comportamiento durante el mismo. Con base en los autores antes mencionados se describirá la función de cada componente:

#### a) Proteínas

Las proteínas comprenden largas cadenas peptídicas de aminoácidos, siendo la carne muy buena fuente de proteínas de alta calidad y representan el componente más abundante de la materia seca del músculo, además de desempeñar un papel fundamental en los cambios que se originan después de la muerte animal y en las propiedades de la carne para su consumo.

La carne contiene alrededor del 20% de proteínas que pueden ser generalmente clasificados según su función fisiológica, de las cuales: el 12% son proteínas estructurales: actina y miosina (miofibrilares), el 6% son las proteínas sarcoplásmicas solubles, que se encuentran en el jugo muscular y, el 2% está en los tejidos conectivos: colágeno y elastina, que recubren la proteína estructural.

El color de la carne es un parámetro muy importante que puede influir en las decisiones de compra de los consumidores. La mioglobina es el pigmento en la carne responsable de su color y está compuesta por una fracción proteica (globina) y el grupo hemo.

Es importante mencionar que este alimento aporta en promedio el 40% de los aminoácidos "esenciales". Este tipo de aminoácidos son los que no se pueden ser sintetizados por el cuerpo y deben ser suministrados por la dieta.

#### b) Lípidos

Las células grasas se encuentran presentes en el tejido conectivo en la parte externa de las fibras musculares; cuando se encuentra en abundancia, dan a la carne una apariencia marmoleada que contribuye a la jugosidad y sabor, éste es un importante parámetro que también puede afectar la firmeza de la carne. La grasa del tejido adiposo está constituida en su mayoría por triacilglicéridos, mientras que la grasa intramuscular contiene una proporción de fosfolípidos y colesterol.

La grasa puede estar presente en la carne como: grasa intermuscular, grasa intramuscular o grasa subcutánea, con la función de almacenar energía, al producir 2.25 veces más energía en comparación con las proteínas o carbohidratos. Por lo tanto, los lípidos de carne comprenden principalmente ácidos grasos monoinsaturados y saturados, dentro de los cuales, se encuentran el oleico, palmítico y ácidos esteáricos. A su vez, las aves y la carne de cerdo contienen algo más de ácidos grasos insaturados que la carne de res y el cordero, y también una cantidad notable de ácidos grasos poliinsaturados.

### c) Agua

Con base en lo publicado por, Huff-Lonergan y Lonergan (2005) la mayor parte de esta humedad se encuentra dentro de las miofibrillas (intracelularmente) y en menor proporción, los espacios entre las mismas (intercelularmente). El agua, al ser una molécula dipolar es atraída a otras moléculas cargadas y dependiendo de la fuerza de la atracción, se puede clasificar en 2 niveles:

- Agua no congelable: Las moléculas de este tipo interactúan con compuestos no acuosos, como la proteína en el caso de la carne, teniendo fuerte atracción hacia ellos, lo que les da una movilidad reducida y trae como consecuencia que, no se pueda eliminar por secado convencional y que sea muy resistente a la congelación.
- Agua congelable: ésta es retenida dentro de la carne por efectos estéricos y por atracción con el agua ligada, no tiene interacción con las proteínas, por lo cual se puede remover fácilmente por secado o congelar sin problema, además de que, puede salir de la carne como exudado si se produce algún daño estructural o un cambio en el pH.

Por otro lado, Offer y Trinick (1983) y Puolanne y Holanen, (2010), al profundizar en los mecanismos de retención de agua, formulan tres teorías alrededor del tema:

#### 1. Fuerzas Electroestáticas

La retención del agua dentro de la carne es causada por las proteínas miofibrilares, éstas, al contener grupos polares en sus cadenas de aminoácidos, se ligan con las moléculas del agua por fuerzas electroestáticas.

Esto quiere decir que el agua, al ser polar se orienta por si sola, por ejemplo, cuando existe una carga negativa en la proteína, el hidrógeno del agua se orienta hacia éste y el oxígeno hacia fuera, pudiendo hacer interacción con otras moléculas de agua y formar más capas de moléculas. Se crea una hinchazón de las miofibrillas, e incluso, una solubilización parcial de los filamentos, si existe la presencia de sales o el pH es muy diferente del neutro, dicha hinchazón pudiera ser infinita, pero es limitada

por los puentes cruzados entre los miofilamentos como las líneas Z, los puentes de actomiosina y los filamentos intermedios.

## 2. Fuerzas Osmóticas

Esta teoría tiene que ver también las fuerzas electroestáticas, sin embargo, hace más énfasis en la hinchazón de los filamentos dentro de las miofibrillas. Por ejemplo, suponiendo que el agua está en una solución con NaCl, se produce un enlace selectivo de las proteínas miofibrilares con los iones de cloruro, esto no genera gran repulsión entre los filamentos, pero lo genera entre las moléculas internas de miosina que rompe el eje del filamento y con ello, también la estructura miofibrilar.

Entonces, las proteínas miofibrilares, al ser sólidas no se mueven, en consecuencia, las fuerzas electroestáticas dirigen a los iones de sodio a la superficie de los filamentos, lo que provoca una concentración desigual de iones, este gradiente crea una transferencia de agua por ósmosis al interior de los filamentos. La transferencia podría ser ilimitada, pero una vez más es limitada por los puentes cruzados entre los miofilamentos.

## 3. Fuerzas Capilares

Finalmente, tomamos en cuenta la tensión superficial de agua, cuando ésta se encuentra en un capilar con un diámetro igual al espacio que separa a los filamentos, el líquido podría crear una columna de 300m de alto. De manera que, podemos suponer que la humedad dentro de la carne también puede ser almacenada por capilaridad. (Puolanne y Holanen, 2010)

Por lo tanto, la mayor parte del agua se encuentra retenida dentro de las miofibrillas por la acción de las fuerzas electrostáticas y los efectos osmóticos, sin embargo, una fracción de la misma se encuentra en los espacios extracelulares debido a la capilaridad (Xiong, 2005; Puolanne y Holanen, 2010).

## **1.3 Métodos de conservación de carne por frío**

La carne se caracteriza por su naturaleza perecedera debido a que su alto contenido de proteína, su elevada actividad de agua y su tendencia a la acidificación propicia el medio idóneo para el crecimiento microbiológico. Lo anterior, crea la necesidad

de métodos eficaces de conservación, para tener un adecuado almacenamiento y transportación del producto y conservar las propiedades originales de la carne, y así, satisfacer la gran demanda que ésta tiene como alimento.

En la industria alimentaria, el método más común de conservación es el frío, por retardar la alteración producida por causas físicas y químicas, además de microbiológicas, por ello se ahondará en este tema a continuación, además de ser uno de los temas principales de esta investigación (Price y Schweigert, 1971).

### **1.3.1 Refrigeración**

La refrigeración es una rama de la ingeniería que se especializa en la reducción y mantenimiento de una temperatura inferior, en un espacio o material con respecto a sus alrededores. Para lograrlo se debe sustraer el calor de un cuerpo transfiriéndolo a otro con una temperatura menor, que se denomina refrigerante, en otras palabras, es un proceso de eliminación de calor (Guerrero, Hui y Rosimini, 2006).

Para refrigerar la carne, ésta debe ser enfriada inmediatamente después de la matanza en cámaras frigoríficas que se mantienen entre los 2 y 4°C. La velocidad de enfriamiento en las canales depende de su tamaño, su capacidad calórica y su cobertura de grasa, así como, de la circulación del aire y la temperatura dentro de la cámara que debe tener una humedad relativa entre el 88 y el 92%.

Ahora bien, las velocidades de las alteraciones por reacciones químicas, enzimáticas y el crecimiento microbiano, es aproximadamente proporcional, ya que no es lineal a la temperatura de la carne, y es variable dependiendo de la reacción. Cuando la temperatura es menor a -2°C, el agua presente en la carne comienza a congelarse, cambia su estado físico y disminuye al mínimo la velocidad las reacciones químicas y enzimáticas (Price y Schweigert, 1971).

### **1.3.2 Congelación**

La congelación es uno de los métodos de conservación de alimentos más populares y eficientes que se utilizan actualmente. Se debe a que la transformación del agua, presente en las células y en los espacios intercelulares, de líquido a sólido, reduce

las actividades microbiológicas y enzimáticas. Sin embargo, los cristales formados durante la misma tienen una gran influencia en la calidad de los alimentos, causando pérdidas de agua por goteo, modificaciones de textura y color después de descongelarse (Chevalier, Le Bail y Ghoul, 2000).

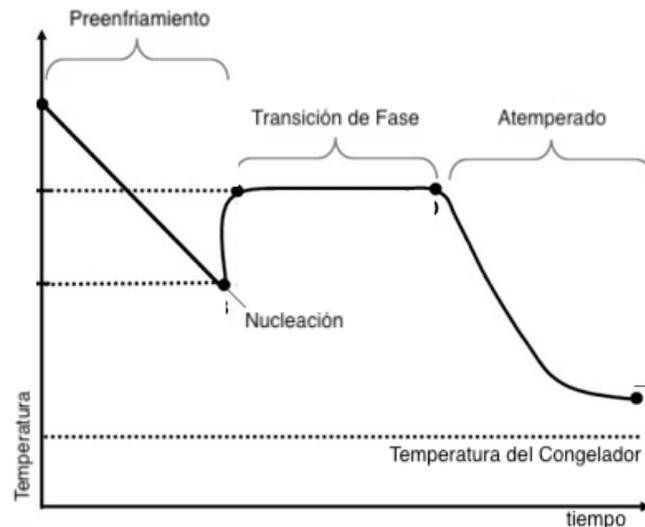
Kani y Sun (2011) publicaron que la congelación se compone de 3 etapas como puede verse en la Figura 4:

1. Pre-enfriamiento: consiste en la pérdida del calor sensible del alimento, su punto inicial de congelación.
2. Transición de fase o congelación: en esta etapa se elimina el calor latente de solidificación, lo que provoca que se de un cambio de estado físico en la mayor parte del agua del producto de líquido a sólido, mientras la temperatura se mantiene constante hasta que se completa éste.
3. Atemperado o sub-enfriamiento: finalmente, cuando el alimento ya está congelado, comienza un descenso de temperatura hasta llegar a una temperatura aproximada a la del medio donde se está congelando.

Al cambio de estado físico en la transición de fase se le llama cristalización, ésta se conforma de dos etapas diferentes relacionados con la formación de una red de cristales de hielo: la nucleación y el crecimiento del cristal. Éstas se ven influenciadas por concentración, la temperatura, la transferencia de masa y calor y las características particulares del material a congelar.

- Nucleación: se denomina a la formación de un nuevo cristal a partir de una fuerza impulsora llamada saturación o sub-enfriamiento, se puede dar como nucleación primaria, cuando ocurre en una solución sin otros núcleos, o como nucleación secundaria, cuando ya existen otros cristales; también se puede dar de manera homogénea cuando es en un líquido sin cualquier otro sólido, o de manera heterogénea si hay presencia de otras partículas.
- Crecimiento del cristal: En esta etapa, los núcleos iniciales forman una estructura, sobre la cual, se depositan los siguientes que se van formando. La nucleación y el crecimiento se dan simultáneamente, y esto, define el

tamaño y la distribución de los cristales, por ejemplo, cuando los núcleos iniciales son numerosos, éstos, limitan el crecimiento de los cristales y cuando los núcleos son pocos, los cristales pueden crecer al tener más espacio.



**Figura 4. Curva de congelación** (Villatoro, 2016)

De acuerdo con Ngapo y col. (1999), la calidad resultante de carne congelada se debe principalmente al tamaño de los cristales que se forman durante la congelación, y esto depende principalmente de la velocidad de congelación.

El efecto de la velocidad de congelación en el tamaño de cristal fue descrito en las publicaciones de Barreiro y Sandoval, (2006), Chevalier, Le Bail y Ghoul (2000), Guerrero, Hui y Rosimini (2006), Kiani y Sun (2011), Van der Sman y col. (2013), y con base en ellas describiremos dicha relación.

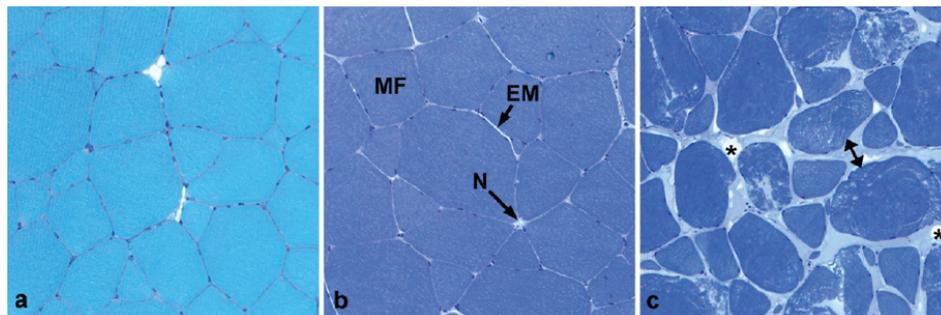
En la congelación lenta, la nucleación se da mayoritariamente de manera extracelular, ya que, en ésta, la nucleación está termodinámicamente dirigida por la presión existente dentro de la célula y, por la membrana celular que representa una barrera a la transferencia de calor, entonces, en este tipo de congelación de carne, los primeros núcleos de cristalización se forman con el agua presente en los espacios intercelulares.

Cuando el líquido se comienza a cristalizar, los sólidos se concentran en la solución líquida remanente, bajando la temperatura de solidificación de ésta, lo que la hace

más difícil de congelar. El aumento de la concentración de solutos en la solución extracelular también ocasiona un desequilibrio osmótico con el agua intracelular, por esta razón, se da un proceso de transferencia de masa con un flujo de agua que va del interior al exterior de la célula.

El flujo de agua que sale se comienza a cristalizar alrededor de los núcleos ya formados, lo que resulta en la formación de un pequeño número de cristales de gran tamaño que pueden agrandar los espacios intercelulares (como se ve en la Figura 5), perforar las membranas celulares y causar un daño estructural (como se ve en la Figura 6). Además, el tiempo que le toma al agua solidificarse con este tipo de congelación permite que, las soluciones que se concentraron puedan causar una probable desnaturalización de proteínas, y así, reducir la capacidad de retención de agua en el alimento.

En la Figura 5 se muestra: a) Salmón fresco *pre-rigor mortis*, b) Salmón fresco *post-rigor mortis*, C) Salmón congelado a  $-25^{\circ}\text{C}$  y descongelado a  $4^{\circ}\text{C}$ . Donde: MF (Miofibrilla), EM (Endomisio), N (Núcleo), la doble flecha indica el ensanchamiento extracelular de la cristalización lenta y el asterisco indica daño estructural por la congelación (Aursand, y col., 2009)

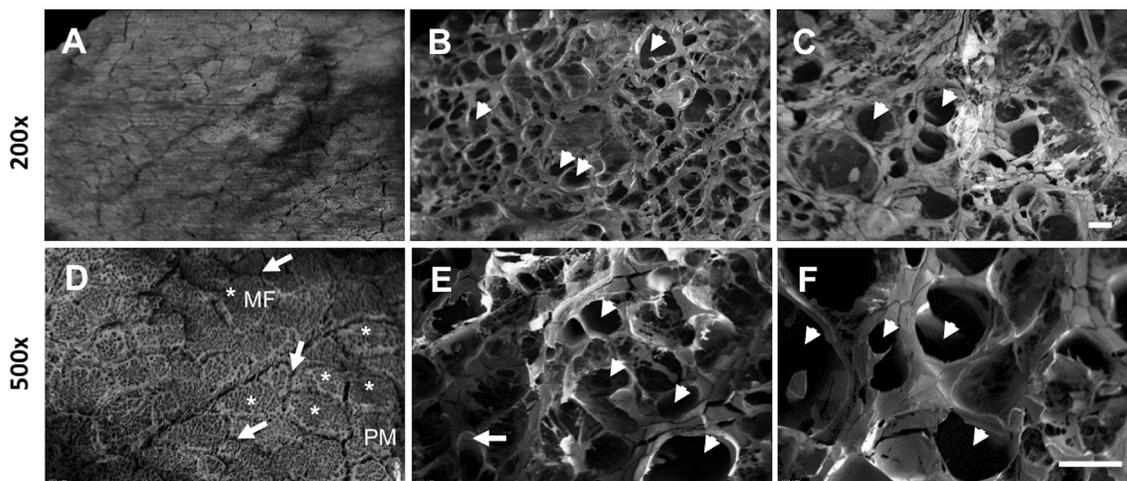


**Figura 5. Carne de salmón, *pre-rigor*, *post-rigor*, congelada y descongelada**  
(Aursand, y col., 2009)

Por otro lado, en la congelación rápida, que se lleva a cabo con temperaturas extremadamente bajas como la del nitrógeno líquido ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), se forman una gran cantidad de núcleos dentro y fuera de la célula, lo que limita el crecimiento del cristal, por lo tanto, se forman cristales finos distribuidos uniformemente y que causan un menor daño estructural como se ve en la Figura 6.

Cómo el tiempo no es suficiente para que existan diferencias marcadas en las concentraciones salinas del líquido remanente sin congelar dentro y fuera de la célula, no se da un desequilibrio osmótico, y por lo tanto tampoco una desnaturalización de proteínas, por eso su capacidad de retención de agua se ve menos afectada.

En la Figura 6 se muestran imágenes representativas de Cryo-SEM para lomo de cerdo congelado con nitrógeno líquido  $-196^{\circ}\text{C}$  (A, D), y en congeladores a  $-35^{\circ}\text{C}$  (B, E) y a  $-25^{\circ}\text{C}$  (C, F). Las imágenes A-C y D-F se registraron con un aumento de 200x y 500x. Las grandes cavidades son un indicativo de daño por la formación de grandes cristales de hielo y fueron evidentes con congelación a  $-35^{\circ}\text{C}$  y  $-25^{\circ}\text{C}$  (puntas de flecha). Además, los rasgos morfológicos característicos, como la separación de fibras musculares individuales (MF, flechas) por el tejido conectivo (perimio, PM, asteriscos) permanecieron mayormente intactos solo en las muestras congeladas criogénicamente (A, D) (Egelandsdal y col., 2019).



**Figura 6. Daño estructural causado durante la congelación** (Egelandsdal y col., 2019).

Es importante mencionar que solo se puede controlar el tamaño de cristal si se mantiene toda la muestra a una temperatura similar. De acuerdo con Bevilacqua, Zaritzky y Calvelo, (1979), cuando la carne es congelada en piezas de gran tamaño, se pueden distinguir tres zonas de formación de cristales dependiendo de la velocidad de transferencia de calor que exista en cada capa:

- 1) En una zona pequeña cerca de límite exterior, el hielo se forma intracelularmente por nucleación, formando cristales muy pequeños debido a que la congelación es rápida en esta capa, porque la absorción de calor es alta debido a la cercanía con el exterior donde el gradiente de temperatura es amplio.
- 2) En la zona intermedia, tiene una congelación más lenta al ser una zona más profunda en la carne, en ésta, el hielo se forma inter y extracelularmente, crece como dentritas y está limitada por una temperatura igual a la temperatura de equilibrio.
- 3) La zona central es la que tiene la congelación más lenta por su ubicación, aquí la formación de hielo es extracelular solamente, contiene los cristales más grandes de las tres zonas debido a que el tamaño de cristal se regula por la velocidad de congelación.

Guerrero, Hui y Rosimini (2006), reportan que el método de congelación tiene una influencia moderada en la calidad de los productos cárnicos, siendo los congelados con líquidos criogénicos con bajo punto de ebullición, los que tienen un menor efecto negativo sobre la misma. Esto se debe a que los cristales que se forman son tan pequeños que apenas y lesionan el tejido tisular. Cuando la carne se encuentra congelada, se observan grandes cavidades que causan una distorsión en la estructura de la célula muscular, sin embargo, la estructura de la carne parece recuperarse casi por completo después de la descongelación.

Las características de la carne son muy similares a los de productos frescos, a excepción del color de la superficie, que es más claro, debido a la reflectancia de la luz por los pequeños cristales que están distribuidos uniformemente, sin embargo, el almacenamiento en congelación afecta desfavorablemente y de una forma progresiva al olor y al sabor.

### **1.3.2.1 Descongelación**

La carne que a menudo es congelada para mantener su calidad y hacer más fácil su manejo y transporte, debe descongelarse para ser procesada; la descongelación, al igual que la congelación, es una operación a la que se le debe poner atención, ya

que de ésta también depende si se mantienen en su mayoría las características físicas y organolépticas del producto.

Existen tres métodos para descongelar la carne: aire frío, temperatura ambiente y agua circulante; su mecanismo de acción consiste en suministrar energía térmica al alimento para que ocurra el proceso contrario a la congelación, es decir, se funden los cristales de agua (Price y Schweigert, 1971; Añón y Calvelo, 1980; Barreiro y Sandoval, 2006).

En general, existe consenso en la literatura científica sobre el hecho de que la congelación, el almacenamiento congelado y la descongelación, contribuyen a una disminución de la capacidad de retención de agua en la carne; la pérdida en la capacidad de retención de agua está relacionada con el daño causado en la estructura de la fibra, así como, la modificación y / o desnaturalización de las proteínas durante la congelación, este fenómeno se ha asociado con el tamaño y la distribución de los cristales de hielo que se forman a lo largo del gradiente de congelación (Añón y Calvelo, 1980; Leygonie, Britz, y Hoffman, 2012; Zhang y Ertbjerg, 2019).

En términos de descongelación, existen grandes diferencias de opinión con respecto a la correlación entre la tasa de descongelación y la extensión del exudado formado. En general, se cree que la formación de cristales de hielo es responsable de la formación de exudado como se ve en la Figura 7 y que el tamaño y la distribución de los cristales de hielo en el interior y fuera de las fibras musculares se ven afectadas principalmente por la tasa de congelación (Leygonie, Britz, y Hoffman, 2012).



**Figura 7. Exudado en la carne (Lureña, 2013)**

Añón y Calvelo (1980), Hamm (1986), Leygonie, Britz y Hoffman (2012) y Zhang y Ertbjerg (2019); describen el efecto de la velocidad de la congelación sobre el exudado liberado durante la descongelación de la siguiente manera. Como ya sabemos, la congelación lenta crea cristales de gran tamaño, exclusivamente en la zona extracelular, lo que causa daños mecánicos por contracción y distorsión de las fibras musculares además de una probable alteración en las proteínas por el aumento de la fuerza iónica.

Ahora bien, cuando el músculo se descongela, el agua congelada se libera y puede interactuar con las proteínas musculares de nuevo para ser reabsorbida, sin embargo, los daños antes descritos causan que se retenga menos agua, creando una gran cantidad de exudado, siendo mayor si la pared celular también ha sido dañada. Aunado a esto, el agua congelada se encuentra en su totalidad en la zona extracelular, lo que quiere decir que ya ha cruzado el sarcolema, entonces, al descongelarse, el agua llega con mayor facilidad a la superficie de la carne, creando una pérdida de ésta. Por otro lado, en la congelación rápida, la formación de numerosos y pequeños cristales de hielo se da en su mayoría intracelularmente, lo que quiere decir que hay una competencia por el agua entre los cristales de crecimiento intracelular y extracelular. Esto evita la distorsión celular y la salida de agua al espacio extracelular.

Cuando la descongelación tiene lugar, ya que el agua no ha sido liberada de las fibras, se retiene más fácilmente, porque que tiene que migrar a través de la membrana del sarcolema para alcanzar los espacios extracelulares entre las fibras musculares, antes de llegar a la superficie de la carne para poder salir como exudado, produciendo en consecuencia una disminución en pérdida de agua. Del mismo modo, el tiempo de descongelación es una variable importante, y éste, depende principalmente de la temperatura inicial del producto, su capacidad calorífica, de la naturaleza del medio de descongelación (agua o aire), su temperatura y su velocidad de circulación, además del tamaño de la pieza del alimento (Añón y Calvelo, 1980; Barreiro y Sandoval, 2006; Price y Schweigert, 1971).

González-Sanguinetti, Añón y Calvelo (1985) concluyeron que una disminución en el tiempo de descongelación (tiempo transcurrido de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $-1^{\circ}\text{C}$ ), por debajo de 50 min resultó en una disminución del exudado. Esto se debe a que el agua resultante de la fusión del hielo se va liberando a una velocidad en que las fibras deshidratadas de la carne son capaces de reabsorberla.

Sin embargo, también aseveran que, a mayores tasas de descongelación, la tasa a la que el agua está disponible excede la velocidad a la que las fibras pueden reabsorber agua, y el exceso se libera como exudado.

## **1.4 Deshidratación osmótica de la carne**

A pesar de que ya abordamos el tema de la deshidratación osmótica, cuando se trata de deshidratación de proteínas animales con NaCl como agente osmótico, debe ser tratado como un tema aparte ya que es un fenómeno complejo. Lo anterior es debido a que la interacción entre la actina, la miosina y la sal, modifica continuamente el mecanismo de transferencia de masa, llevando a un hinchamiento o encogimiento de las fibras de la carne como consecuencia de la modificación de la capacidad de retención de agua y del potencial químico de la misma, que da lugar a una transferencia de agua y sal en la misma dirección, o a contra corriente, ya sea hacia dentro o hacia fuera, dependiendo de la concentración de la solución osmótica.

Ahora bien, cuando el músculo está sumergido en la solución osmótica, la velocidad de difusión tanto del agua como de la sal está relacionada directamente con la concentración de la sal en la solución y, además, con el tiempo de inmersión, la temperatura, el pH, y la estructura de la carne. Es importante tener en cuenta que la presencia de NaCl repercute en la capacidad de retención de agua, la textura, el punto isoeléctrico de ésta y la funcionalidad de sus proteínas, situaciones que podemos usar a nuestro favor (Gallart-Jornet y col., 2007; Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2008).

La carne puede ganar o perder agua dependiendo de la concentración de la solución, debido a su capacidad de retener agua bajo ciertas condiciones. Cuando

sumergimos la carne en una solución de baja concentración, obtenemos una ganancia de agua junto con una ganancia de sólidos, que aumenta conforme lo hace la temperatura, de modo que, podemos obtener un producto con características de textura y sabor deseables, y es a lo que se le conoce como marinado (Gallart-Jornet y col., 2007; Volpato y col., 2007; Kowalska, Lenart y Leszczyk, 2008; Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2008; Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2009).

En la transferencia de solutos durante la deshidratación osmótica, la ganancia de los mismos está relacionada con el equilibrio que existe entre la concentración de sal que hay en la carne y en la salmuera, esto quiere decir que, mientras más concentrada esté la solución, mayor será la cantidad de sal que tendrá el alimento en la superficie, lo que lleva a una mayor ganancia de solutos, una mayor desnaturalización de proteínas y por lo tanto, una textura más firme (Graiver y col., 2006; Gallart-Jornet y col., 2007).

Cuando hay una inmersión de carne en un gran volumen de solución con una baja concentración de NaCl, se presenta un hinchamiento del músculo que puede incrementar su volumen hasta un 80%, evidentemente la expansión depende de la concentración de la solución y del agua absorbida por la capilaridad de los espacios intercelulares. Lo que pasa en la estructura, es que parte de los iones de cloro hacen enlaces con la actina y miosina, lo que incrementa las cargas negativas y, por lo tanto, aumentan las fuerzas de repulsión entre los filamentos terminando en el hinchamiento de la carne. Es importante remarcar que la concentración crítica de NaCl que separa la hidratación y la deshidratación de la carne es del 13 al 14% (Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2008; Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2009).

En contraste con lo anterior, cuando está presente una alta concentración de NaCl y las proteínas miofibrilares se despolarizan, la carne pierde agua como consecuencia. La despolarización de los filamentos gruesos de miosina comienza a concentraciones superiores a 6%, llegando a un nivel que afecta a la capacidad de retención de agua a concentraciones de 14% (Gallart-Jorne y col., 2007; Schmidt, Carciofi y Laurindo, 2008).

Finalmente, durante la deshidratación, el contenido de agua de la superficie de la muestra se reduce, como el resultado de la dispersión del agua de capas más internas. La distribución del agua dentro de la carne no es homogénea al final del proceso de deshidratación, sin embargo, el contenido de agua se vuelve uniforme en unas horas (Muguruma y col., 1987).

### **1.4.1 Efecto de la sal en la carne**

Como ya vimos a lo largo de este texto, la sal tiene un factor primordial en la deshidratación osmótica de la carne, debido al efecto que tiene sobre las proteínas miofibrilares, pero para poder describir mejor estas interacciones, debemos empezar por describir que es el cloruro de sodio, también conocido como sal común.

La sal común se define, en cuanto a producto para uso alimenticio, como un compuesto cristalino constituido esencialmente por cloruro de sodio (NaCl), cuyas condiciones de pureza y de higiene son aptas para su empleo en la alimentación humana.

Se trata de una sal neutra, formada por cristales cúbicos, incoloros, inodoros, muy higroscópicos, de sabor salado con un punto de fusión de 81 °C, cuya solubilidad acuosa origina a temperatura ambiente, soluciones saturadas con 26.5% de sal, una densidad de 1.2 g/ml y un pH entre 6.7 y 7.3. Se comercializa cristalizada o en grano, en los que la granulometría desempeña un importante papel en cuanto a la velocidad de solución, que será más rápida, mientras más fino sea el grano (Bello, 2008).

Ahora bien, la sal tiene varios roles importantes en la deshidratación osmótica de carne, por ejemplo; reduce la actividad de agua, produciendo un efecto de conservación, puede aumentar la capacidad de retención de agua, ayuda a la emulsificación de grasas, y también, debido a que la actina y miosina son solubles en sal, produce características específicas de textura (Aliño y col., 2009; Siró y col., 2009; Castro-Giráldez y Fito, 2010).

Lo que hace a la interacción de la sal con la carne un fenómeno complejo, es el efecto que el NaCl tiene en las proteínas de la carne, ésta, solubiliza las proteínas

miofibrilares y la solubilización incrementa conforme incrementa la concentración de sal (Puolanne y Holanen, 2010).

Por otro lado, sabemos que las proteínas tienen una carga electrostática, lo que hace que se repelan entre sí, de suerte que un aumento en las cargas electrostáticas, producido por el ion cloruro, guía al hinchamiento de la carne. Lo anterior también se ve afectado por el pH del alimento, por ejemplo, cuando la carne tiene un pH de 5.5 a 6, la carga de los filamentos de actina y miosina se vuelve negativo y con la adición de sal, la misma tiende a ensanchar la red de proteínas, lo que aumenta la capacidad de retención de agua (Puolanne y Holanen, 2010).

Para lo ya mencionado, la concentración de la sal al interior del alimento es de vital importancia, ya que las estructuras del producto comienzan a disociarse con concentraciones internas de sal superiores a 1.4%, también las miofibrillas empiezan a hincharse de agua a 2.9% sin la presencia de fosfatos, y a 2.3% con ellos, a esta misma concentración también comienza la extracción de miosina del alimento. Del mismo modo, si queremos lograr el hinchamiento máximo de las miofibrillas, necesitaremos que la concentración a nivel estructural sea de 4.6 a 5.7%, con esta cantidad de sal, una parte substancial de la banda A es extraída. Finalmente, cuando pasamos este valor, el músculo comienza a perder la capacidad de retención de agua y se va encogiendo conforme va aumentando la concentración (Castro-Giráldez y Fito, 2010).

# **2. Metodología Experimental**

Este trabajo se realizó en el laboratorio 13 “Análisis Térmico y Estructural de Alimentos”, de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán campus 4, perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México.

## **2.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto de la congelación y descongelación sobre la ganancia de solutos y la pérdida de agua, en el salado por ósmosis de carne de cerdo (*Longissimus thoracis*), determinando la cinética del proceso y el coeficiente de difusión de solutos, para mediante la metodología Taguchi, definir las mejores condiciones del pretratamiento.

## **2.2 Objetivos Particulares**

### **Objetivo Particular 1**

Evaluar el efecto del método de congelación de carne (*Longissimus thoracis*) determinando el exudado, para inferir, mediante metodología Taguchi, el daño en la estructura de ésta.

### **Variables:**

VI: Velocidad de congelación y descongelación, espesor.

VD: % exudado.

VR: Retención de agua.

### **Hipótesis:**

La formación de cristales grandes favorecerá a un mayor daño estructural en la carne y una mayor concentración de solutos en el agua no congelable, debido a lo cual habrá una mayor desnaturalización de proteínas, que derivará en una pérdida en la capacidad de retención de agua y como consecuencia en una mayor cantidad de exudado.

### **Niveles de variación:**

Espesor de la carne: 1.0 y 0.5 cm.

Método de congelación: cámara (-25°C) y nitrógeno líquido (-196°C).

Método de descongelación: cámara (4°C) y ambiente (20°C).

### **Objetivo Particular 2**

Analizar el efecto del daño estructural de carne de cerdo (*Longissimus thoracis*) resultante de la congelación y descongelación sobre la ganancia de solutos y la pérdida de agua, determinando los parámetros osmóticos y el coeficiente de difusión de solutos para, mediante metodología Taguchi, definir las condiciones de manipulación previa y de proceso que tienen mayor efecto sobre éste.

### **Variables:**

VI: Método de congelación y descongelación, espesor.

VD: Ganancia de solutos, pérdida de agua.

VR: Parámetros osmóticos (SG, WL), Coeficiente de difusión de solutos.

### **Hipótesis:**

A pesar de que los cristales grandes causarían un mayor daño estructural que favorecerá a la transferencia de solutos, también causarían un mayor exudado, por lo que ocasionara una mayor transferencia de agua durante la deshidratación osmótica.

### **Niveles de variación:**

Espesor de la carne: 0.5 y 1.0 cm.

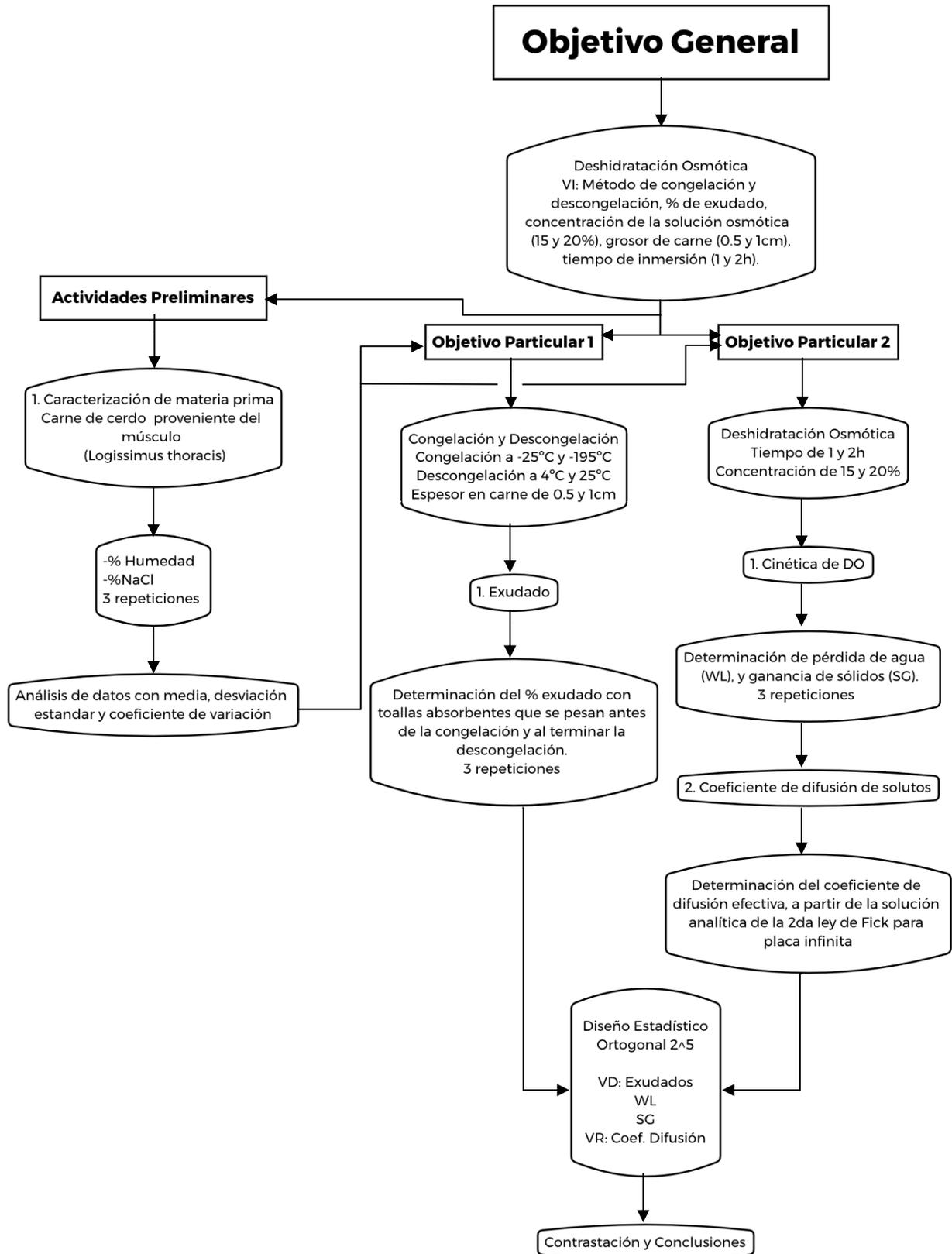
Método de congelación: cámara (-25°C) y nitrógeno líquido (-196°C).

Método de descongelación: cámara (4°C) y ambiente (25°C).

Concentración de la solución osmótica: 15 y 20% de NaCl.

Tiempo de inmersión: 1 y 2 horas.

## 2.3 Diagrama Experimental



## 2.4 Actividades Preliminares

### 2.4.1 Caracterización de la materia prima

Para la experimentación se utilizó carne de cerdo proveniente del músculo *Longissimus thoracis* de macho castrado de 6 meses de edad con un peso aproximado de 110kg, además de 24 horas de reposo *post mortem*. La carne fue adquirida con un proveedor local de Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

También se utilizó nitrógeno líquido, cloruro de sodio comercial y agua destilada adquiridos con comerciantes locales, siempre de la misma marca y presentación para evitar desviaciones durante la experimentación.

#### 2.4.1.1 Humedad

Para la determinación de humedad de la carne fresca (NOM-116-SSA1-1994) se utilizaron charolas de aluminio circulares desechables y prefabricadas, a éstas se les introdujo una capa de gasa simple y estéril que cubría totalmente la superficie de la charola, posteriormente se pesó el conjunto de la charola con la gasa en una balanza Scout Pro SP202 (Ohaus Corporation) y con esto, obtuvimos la masa de la charola con gasa.

Para obtener la muestra de carne, ésta se pico finamente y se pesaron 3g de la misma dentro de la charola con la gasa previamente pesadas y así, se obtuvo la masa de la muestra húmeda.

La muestra se introdujo al horno de convección marca Ecoshel, modelo 9023<sup>a</sup>; siguiendo el protocolo descrito en la norma NOM-116-SSA1-1994, para obtener la masa de la muestra seca.

El contenido de humedad de la carne se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{M2 - M3}{M2 - M1} \quad (15)$$

Donde:

M1 = Peso de la charola con gasa (g).

M2 = Peso de la muestra húmeda en la charola con gasa (g).

M3 = Peso de la muestra seca en la charola con gasa (g).

Las actividades anteriormente descritas se realizaron por triplicado y se analizaron con medidas de tendencia central y de dispersión.

#### **2.4.1.2 Contenido de Sal**

Para obtener la salinidad de la carne era necesario tener la muestra seca, en consecuencia, se decidió utilizar la muestra resultante de la prueba de humedad. La carne seca se molió finamente en un mortero de porcelana hasta obtener un polvo, se agregaron 20ml de agua destilada a 90°C directamente al mortero y se agitó, para posteriormente dejarla reposar 5 min (Graiver y col., 2006).

La solución obtenida se filtró y fue depositada en un vaso de precipitados, de ella, se tomó una muestra con gotero que se depositó en un refractómetro de salinidad ATC-S/Mill-E (Atago Co.) obteniendo así el nivel de salinidad de la solución.

Con los datos obtenidos del refractómetro, la salinidad de la carne fresca se determinó mediante la siguiente ecuación (Graiver y col., 2006).

$$\%NaCl = \frac{Ms * Xs}{Mms} \quad (16)$$

Donde:

Ms: Peso de la solución (g)

Xs: Fracción de NaCl en la solución

Mms: Peso muestra seca (g)

Las actividades anteriormente descritas se realizaron por triplicado y se analizaron con medidas de tendencia central y de dispersión.

### **2.5 Objetivo Particular 1**

Para este objetivo se agruparon placas de carne de 1 cm de largo por 1 cm de ancho, en conjuntos de 4cm de largo por 3 cm de ancho, quedando en total 12

placas, se pusieron sobre una toalla absorbente, se introdujeron a una bolsa de cierre hermético para evitar quemaduras por frío, y se congelaron en cámara a -25°C o por contacto directo con nitrógeno líquido a -196°C. Posteriormente, estas muestras fueron descongeladas en cámara a 4°C o a temperatura ambiente a 20°C.

### **2.5.1 Exudado**

Para determinar el exudado, tanto la carne como una toalla absorbente se pesaron al inicio del proceso. La toalla absorbió todo el líquido que el alimento desprendió durante la congelación y descongelación, y ésta, se volvió pesar una vez terminado el mismo.

El exudado se obtuvo mediante la siguiente ecuación y el resultado se reportó en porcentaje.

$$\%E = \frac{M_{ft} - M_{it}}{M_{ic}} 100 \quad (17)$$

Donde:

Mit: Peso inicial de la toalla (g)

Mft: Peso final de la toalla (g)

Mic: Peso inicial de la carne (g)

Las actividades anteriormente descritas se realizaron por triplicado y se analizaron con medidas de tendencia central y de dispersión.

Finalmente, los datos fueron introducidos al modelo ortogonal para su análisis en conjunto con las demás variables y también, fueron graficados en barras para obtener la combinación de condiciones que produjo una mayor pérdida de agua por exudado y que, por lo tanto, permitiría inducir el mayor daño estructural.

## **2.6 Objetivo Particular 2**

Para este objetivo se fabricaron unas celdas de deshidratación para identificar cada muestra, el material de la celda fue malla de plástico rígido unido con silicón, la celda consistió en 12 espacios separados de 2x2x2 cm, con unas medidas totales de la

celda de 24x6x2 y una tapa del mismo material. Se utilizaron tres en cada experimentación para tener un total de 36 muestras, cuando el tiempo de la deshidratación osmótica era de dos horas y 27, cuando era de una hora.

Fueron utilizadas las muestras resultantes del objetivo 1 debido a que el método de congelación y descongelación son variables para este segundo objetivo.

La deshidratación osmótica se realizó en un recipiente de aluminio que contenía la salmuera y que, a su vez, estaba inmersa en otro contenedor de plástico con agua, hielo y sal para mantener la temperatura de la solución hipertónica a  $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Los contenedores se encontraban sobre un agitador magnético y la mosca se encontraba dentro del recipiente de aluminio para la homogeneidad ésta.

### 2.6.1 Cinética de Deshidratación

Para determinar los parámetros osmóticos, las muestras se pesaron, se colocaron los cubos resultantes del proceso de congelación y descongelación dentro de las celdas de deshidratación osmótica, y se aseguró la tapa con cinta adhesiva. Las celdas se introdujeron a una solución de cloruro de sodio al 15% o 20% en una proporción de 80:1 en peso, con agitación. Las muestras fueron retiradas cada 5 min, la primera media hora, cada 10min, la segunda media hora y cada 20 min, la última hora si éste era el caso. Fueron pesadas nuevamente, para finalmente, determinar la humedad y la cantidad de sal.

Para determinar los parámetros osmóticos se utilizaron las siguientes ecuaciones (Kayman-Ertekin y Sultanoglu, 2000).

Pérdida de agua

$$\%WL = \frac{M_0 X_0^w - M_t x_t^w}{M_0} X 100 \quad (18)$$

Ganancia de sólidos

$$\%SG = \frac{M_t X_t^{ts} - M_0 x_0^{ts}}{M_0} X 100 \quad (19)$$

Donde:

$M_0$ =Peso inicial de la muestra (g).

$M_t$ = Peso de la muestra al tiempo t (g).

$X_0^w$ =Concentración de agua inicial de la muestra.

$X_t^w$ = Concentración de agua en la muestra al tiempo t.

$X_0^{ts}$ =Concentración inicial de solidos totales.

$X_t^{ts}$ = Concentración de solidos totales al tiempo t.

## 2.6.2 Coeficiente de Difusión

Para determinar los coeficientes de difusión se utilizó la solución de Crank (1975), a la segunda ley de Fick para la difusión de placa infinita con difusión en una sola dirección, donde se considera un estado no estacionario a una concentración inicial uniforme en el tiempo 0 y una concentración constante en la superficie a un tiempo t con un espesor definido de la placa.

Para la difusión de solutos, de la ecuación 9 se obtiene:

$$\ln\left(1 - \frac{M_t}{M_\infty}\right) = -D \frac{q_n^2}{l^2} t + \ln \frac{2\alpha(1 + \alpha)}{1 + \alpha + \alpha^2 q_n^2} \quad (20)$$

Lo que da una ecuación de línea recta ( $y=mx+b$ ), lo que permite graficar  $\ln\left(1 - \frac{M_t}{M_\infty}\right)$  contra el tiempo.

De acuerdo con Crank (1975),  $M_t$  es la concentración en la carne al tiempo t y  $M_\infty$  es la concentración de la muestra después de un tiempo infinito, por lo que considera que, es igual a la concentración de la solución.

Al graficar, la ecuación de la recta resultante mostrará el valor de la pendiente (m), que es igual a:

$$m = -D \frac{q_n^2}{l^2} \quad (21)$$

De la ecuación 21 solo se conoce el valor de  $l$ , que es la mitad del espesor de la muestra, sin embargo  $q_n^2$  se puede obtener del valor de la ordenada al origen (b).

$$b = \ln \frac{2\alpha(1 + \alpha)}{1 + \alpha + \alpha^2 q_n^2} \quad (22)$$

Entonces:

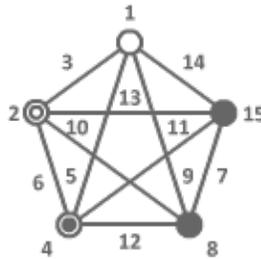
$$q_n^2 = \frac{2\alpha(1 + \alpha)}{e^{b\alpha^2}} - \frac{1 - \alpha}{\alpha^2} \quad (23)$$

Donde  $\alpha$  es la relación que existe entre el volumen de la muestra y el volumen de la solución hipertónica. Cuando se obtiene el valor de  $q_n^2$ , entonces, se puede despejar el coeficiente de difusión.

$$D = -\frac{ml^2}{q_n^2} \quad (24)$$

## 2.7 Análisis Estadístico

Para el análisis de esta experimentación se utilizó la metodología Taguchi con un arreglo ortogonal  $L_2(5)^{16}$  que se ejemplifica en la Figura 8, para obtener el efecto que las 5 variables de los objetivos tienen sobre el coeficiente de difusión de solutos. En esta metodología se realiza un arreglo de corridas experimentales que permite saber cuáles son las mejores condiciones, haciendo un número de éstas inferior al que se haría con otros métodos.



**Figura 8. Arreglo ortogonal  $L_2(5)^{16}$**

Se utilizaron 5 variables que tuvieron dos niveles como se puede ver en la Tabla 2, al final, este análisis estadístico muestra qué combinación de condiciones tuvieron un mayor y un menor efecto sobre el coeficiente de difusión de solutos.

**Tabla 2. Variables y sus niveles**

Variable	Nivel 1	Nivel 2
<b>Espesor de la carne (cm)</b>	0.5	1.0
<b>Método de Congelación</b>	CC= Cámara de congelación (-25°C)	CN= Nitrógeno líquido (-196°C)
<b>Método de Descongelación</b>	D4= Refrigeración (4°C)	D20= Temperatura ambiente (20°C)
<b>%NaCl en la salmuera (m/v)</b>	15	20
<b>Tiempo de Inmersión (h)</b>	1	2

El arreglo se introduce al software estadístico Minitab 16, el cual, indicó las combinaciones de variables que debíamos utilizar para cada una de las 16 corridas y así hacer valido el modelo estadístico Tabla 3.

**Tabla 3. Corridas Experimentales**

Corrida	[ ] sal	Tiempo	Espesor	Método de Congelación	Método de Descongelación
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2
3	1	1	2	1	2
4	1	1	2	2	1
5	1	2	1	1	2
6	1	2	1	2	1
7	1	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2
9	2	1	1	1	2
10	2	1	1	2	1
11	2	1	2	1	1
12	2	1	2	2	2
13	2	2	1	1	1
14	2	2	1	2	2
15	2	2	2	1	2
16	2	2	2	2	1

En esta experimentación solo se hicieron 16 corridas con 3 repeticiones cada una para poder cumplir nuestros objetivos.

# **3. Resultados**

## 3.1 Actividades Preliminares

### 3.1.1 Caracterización de la Materia Prima

Para caracterizar la materia prima, se determinaron los valores de humedad y de cantidad de sal en la carne fresca.

La humedad obtenida fue de 74.56%, que concuerda con Aliño y col. (2009) quienes reportan una humedad experimental de  $72\% \pm 2\%$ , mientras que Amerling (2001) publicó un valor de 75%.

En cuanto al contenido de NaCl, en la bibliografía Aliño y col. (2009) reportan una salinidad inicial de  $0.013\% \pm 0.001\%$ .

## 3.2 Objetivo Particular 1

### 3.2.1 Exudado

Después de haber congelado y descongelado las placas de carne y pesado la toalla absorbente, fueron determinados los porcentajes de exudado de la carne en cada corrida, que, dieron una referencia indirecta del daño estructural que produjo la congelación sobre el alimento.

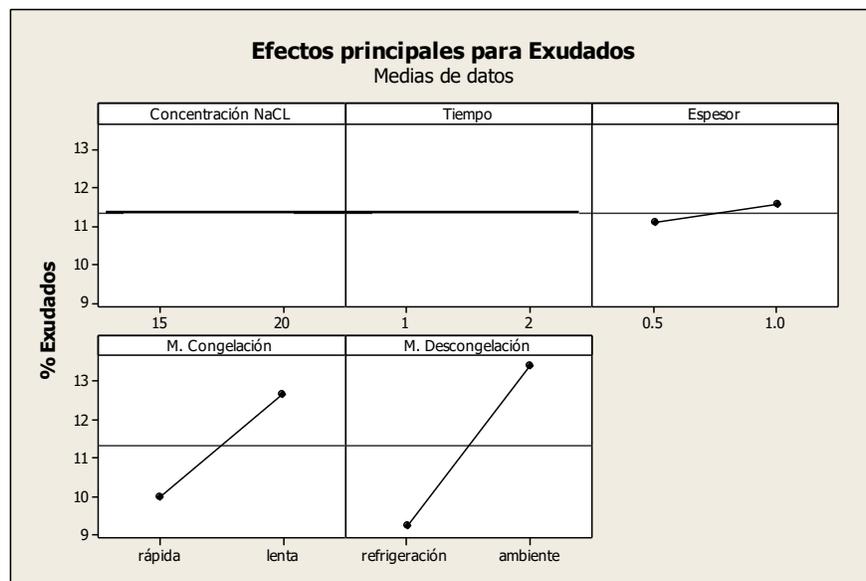
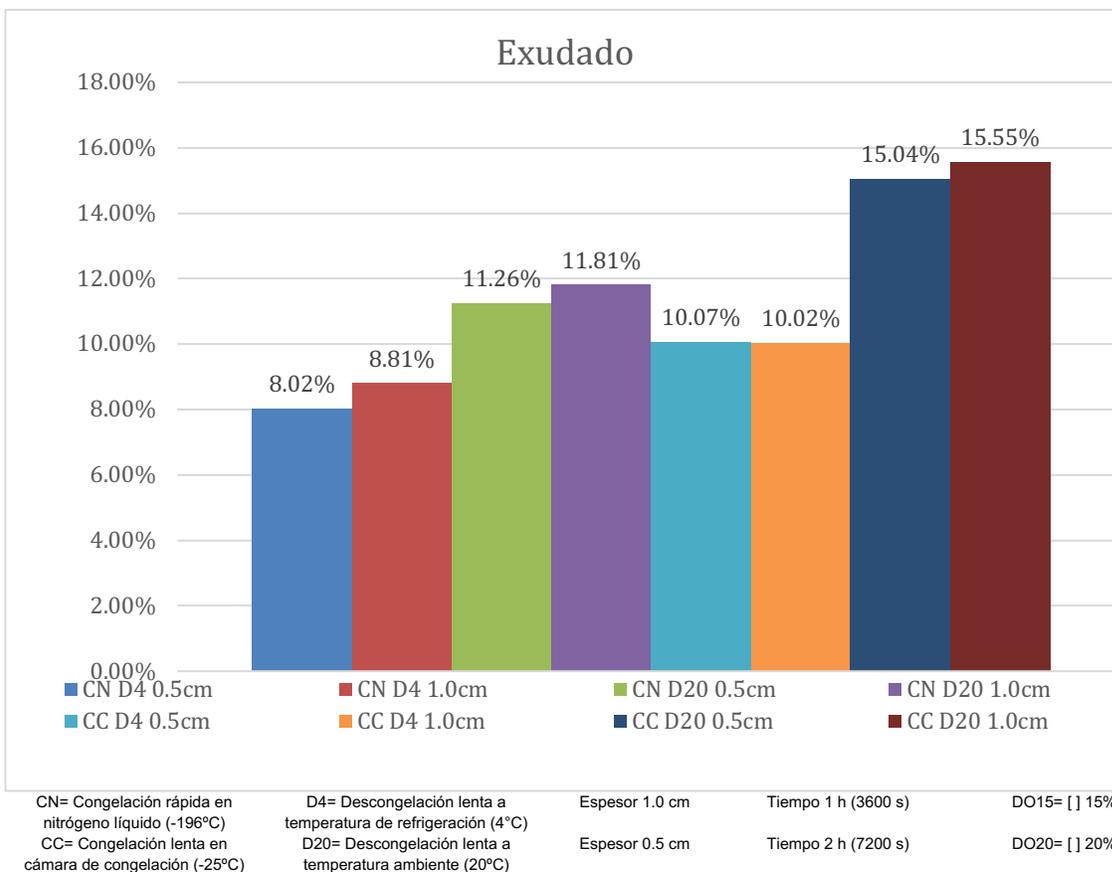


Figura 9. Gráfica de medias para exudados según el método Taguchi

El análisis estadístico permitió, como se muestra en la Figura 9, ver que la combinación de variables que producen una menor cantidad de exudado, son la congelación rápida (CN), con una descongelación lenta (D4) y un espesor de 0.5 cm, lo que permite inferir dos condiciones: que CN es la que menor daño estructural produce, y por lo mismo, ésta mantiene la mayor parte de la capacidad de retención de agua de la carne. Los datos introducidos a éste se muestran en la Figura 10.



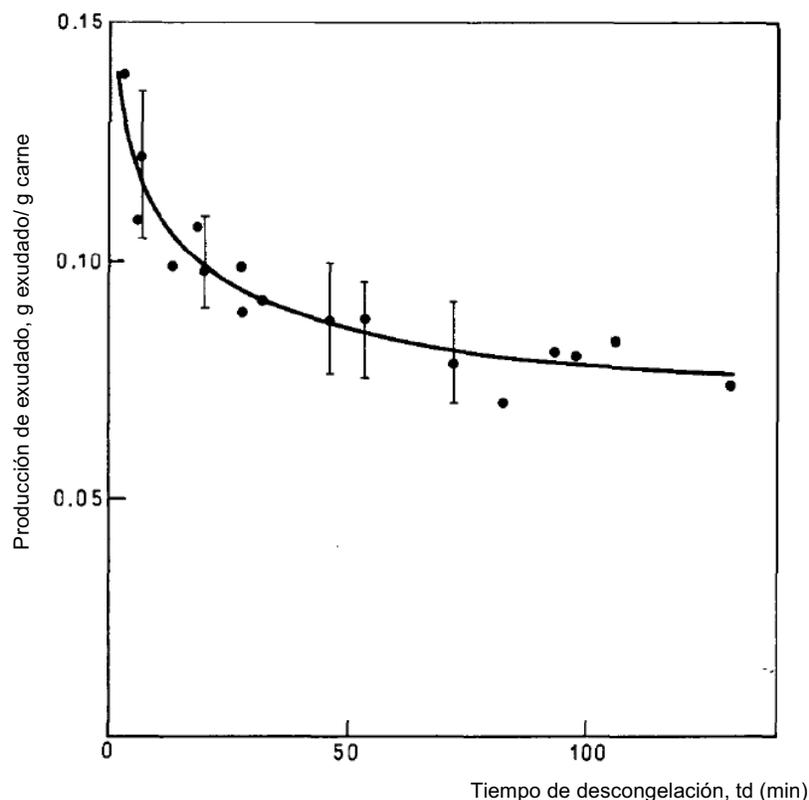
**Figura 10. Porcentaje de exudado**

Los resultados presentados en la Figura 10, se justifican con lo publicado por Hamm (1986), él menciona que CN, al crear cristales pequeños, no daña la estructura miofibrilar de la carne, mientras que una congelación lenta (CC), al crear cristales grandes si lo hace, lo que, en consecuencia, limita su capacidad de reabsorber el agua durante la descongelación. La Figura 10 muestra que D4 tuvo una menor

producción de exudado que la descongelación rápida que se llevó a cabo a temperatura ambiente (D20).

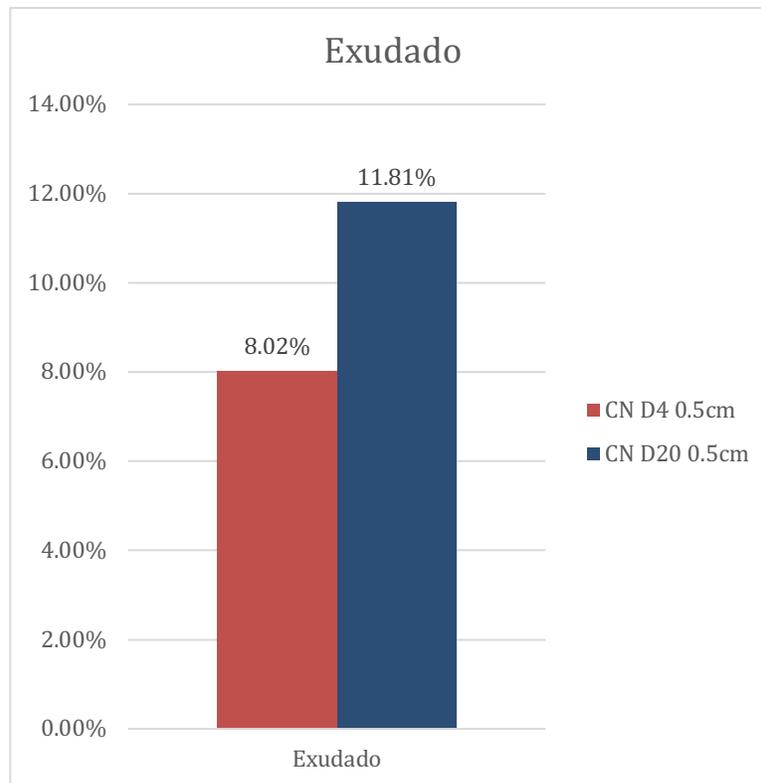
González-Sanguinetti y col. (1985), concluyeron en su investigación que cuando la congelación es lenta, el agua en forma de cristales se encuentra fuera de la célula, de manera que, cuando la descongelación es rápida, las fibras deshidratadas de la carne no tienen la capacidad de introducir todo el líquido a la misma velocidad que se va fundiendo, de modo que, ésta se retiene por un periodo de tiempo en los espacios extracelulares y termina por salir en forma de exudado.

También comentan que lo contrario ocurre cuando la carne es congelada rápidamente, lo que genera cristales pequeños que se encuentran mayormente al interior de la célula y se descongela lentamente. En este caso la velocidad de fusión del hielo permite a las fibras rehidratarse con el agua ya presente en el interior de la célula, lo que produce una menor cantidad de exudado, como mostraron en el gráfico presentado en la Figura 11.



**Figura 11. Efecto de la velocidad de congelación en la producción de exudado** (Gonzalez-Sanguinetti y col., 1985)

La Figura 12 confirma que, a mayor velocidad de descongelación, mayor cantidad de exudado; los resultados obtenidos muestran que D20 produjo exudados de 11% con CN y del 15% con CC, mientras que D4 dio 8% y 10% respectivamente, como se muestra en la Figura 12, donde se comparan los resultados obtenidos con CN, que es el método de congelación más eficiente y las dos velocidades de descongelación.



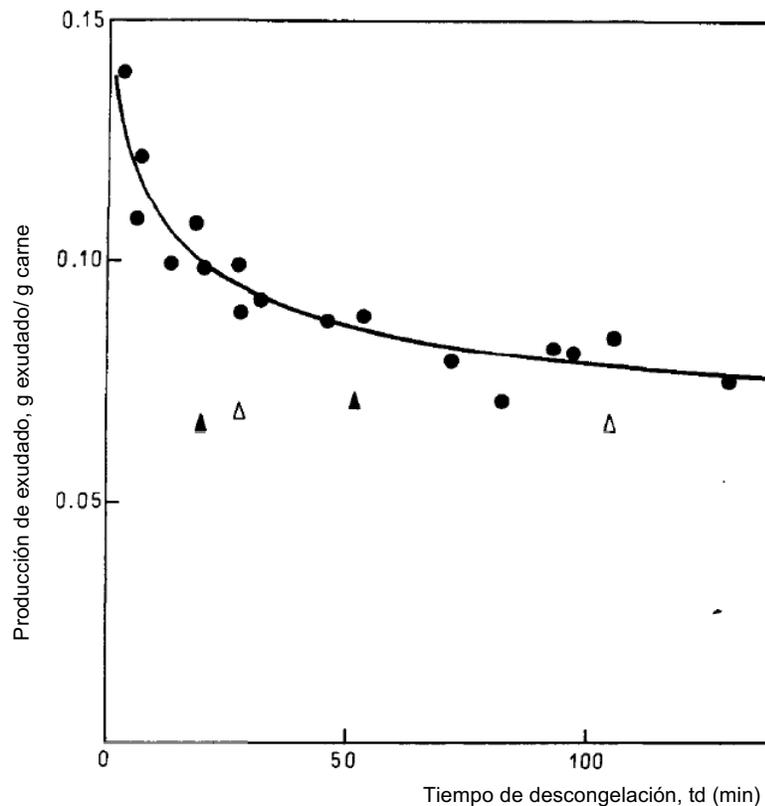
CN= Congelación rápida en nitrógeno líquido (-196°C)	D4= Descongelación lenta a temperatura de refrigeración (4°C)	Espesor 1.0 cm	Tiempo 1 h (3600 s)	DO15= [ ] 15%
CC= Congelación lenta en cámara de congelación (-25°C)	D20= Descongelación lenta a temperatura ambiente (20°C)	Espesor 0.5 cm	Tiempo 2 h (7200 s)	DO20= [ ] 20%

**Figura 12. Porcentaje de exudado: Comparación de exudado, variando la velocidad de descongelación, con el método de congelación constante**

Por otro lado, González-Sanguinetti y col. (1985) mencionan que el exudado que libera la carne puede ser reabsorbido por ésta, si se le da el tiempo suficiente para hacerlo, lo anterior se muestra en un gráfico que presentamos en la Figura 13.

Los autores asumieron que la muestra estaba descongelada cuando ésta tenía una temperatura de -1°C y centrifugaban la muestra para determinar el exudado. En la Figura 13, el punto es la cantidad de exudado de las muestras que fueron

centrifugadas en cuanto se descongelaron, el triangulo blanco es la cantidad de exudado en las muestras que fueron centrifugadas 5 horas después de que se descongelaron y el triangulo negro el exudado cuando las muestras se centrifugaron 24 horas después de la descongelación.



**Figura 13. Producción de exudado como función del tiempo de descongelación** (Gonzalez-Sanguinetti y col., 1985)

La Figura 13 muestra que, más que el tamaño de cristal durante la congelación y la velocidad de descongelación, el tiempo que se le da a la carne después de la fusión del hielo para reabsorber el agua perdida, tiene un efecto determinante en la cantidad de exudado generado. Las muestras que se dejaron 5 y 24 horas con el exudado para que fuera reabsorbido, tienen valores similares sin importar la velocidad de descongelación. Sin embargo, durante esta experimentación, al tener una toalla debajo que iba captando el exudado resultante, no hubo oportunidad a que hubiera un líquido que la carne pudiera reabsorber, por lo que las fibras de la carne quedaron encogidas y en espera de recuperar parte del agua que perdieron durante la descongelación.

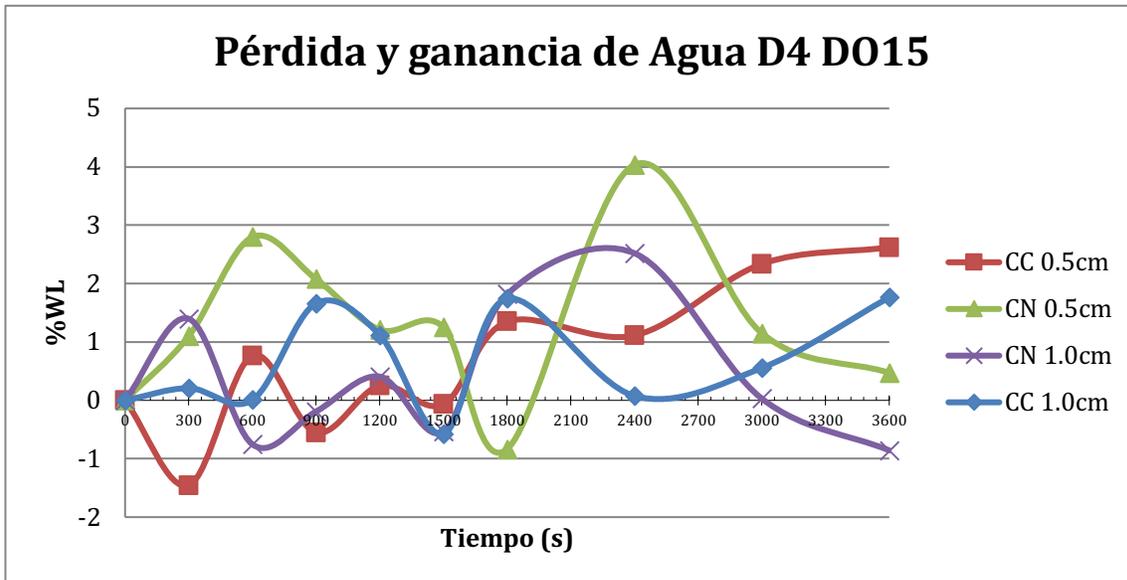
En cuanto al daño estructural, Hamm (1986) y Gonzalez-Sanguinetti y col. (1985), proponen que se debe exclusivamente al que se produce en la membrana celular por el tamaño de cristal durante una congelación lenta, además, Qi y col. (2012); Xia y col. (2010) y Zhang Y Ertbjerg (2019), establecen que, durante la congelación lenta, además del daño estructural por los cristales, existe una desnaturalización de proteínas miofibrilares que puede ser causada por la concentración de solutos en el agua no congelada de la carne. La proteína al ser desnaturalizada se desdobra y, por lo tanto, reduce su solubilidad e incrementa su hidrofobicidad, lo que explicaría el porque la carne no es capaz de mantener su humedad inicial. Entonces, con base en lo publicado por los autores ya mencionados se deduce que la congelación CN con el tamaño de muestra manejado en este proyecto, además de crear cristales de menor tamaño que no dañan la membrana celular, no permite que haya una concentración de solutos, al ser inmediata, y, por lo tanto, no hay una desnaturalización de proteínas.

### **3.3 Objetivo Particular 2**

#### **3.3.1 Pérdida de Agua**

Las curvas resultantes de la cinética de pérdida de agua se redujeron al intervalo de una hora, para mantener el tiempo constante y hacer un mejor análisis, posteriormente, se clasificaron tomando en cuenta dos variables importantes con base en la tendencia obtenida en el objetivo 1, la velocidad de descongelación y la concentración de la solución hipertónica.

Schmidt, Carciofi y Laurindo (2008) publicaron que, en un proceso osmótico la concentración crítica de NaCl, que separa la hidratación y la deshidratación de la carne, es del 14%, en el caso de la Figura 14, la experimentación se realizó a una concentración del 15%, que es bastante cercana a la crítica.

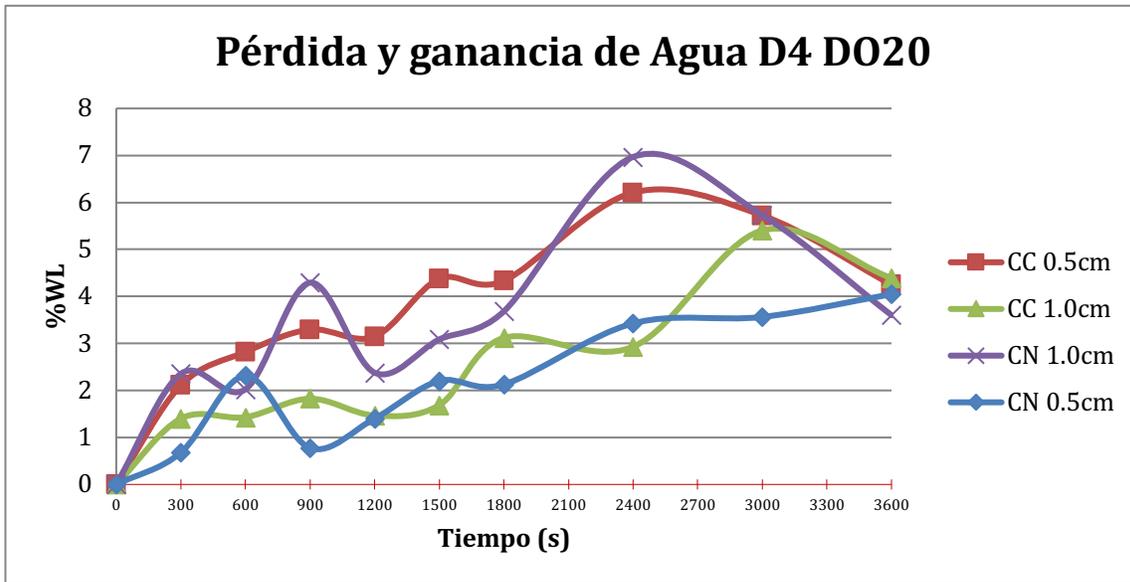


**Figura 14. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 15% de carne descongelada en refrigeración**

La Figura 14 muestra que la concentración del 15% aún tiene la característica de ser concentración crítica, por ello, el comportamiento cinético del flujo de agua en la carne es de ganancia y pérdida. Si se considera que en la zona que rodea a la muestra existe una constante transferencia de masa en contra difusión, se asume que, la concentración de ésta tiende a aumentar o disminuir dependiendo de la magnitud de los flujos, lo que provoca un desequilibrio osmótico de ganancia-pérdida de agua.

Ahora bien, al mantener la misma velocidad de descongelación y aumentar la concentración de la solución hipertónica obtenemos la Figura 15 que muestra el efecto que tiene el aumento de la concentración al 20% en el proceso osmótico, la diferencia de actividad de agua entre la carne y la solución provoca que la humedad de la primera salga para buscar una igualdad de concentraciones.

Por otro lado, con base en los resultados del objetivo 1, las muestras sometidas a D4, fueron las que perdieron menos agua durante el exudado, por lo que iniciaron con un mayor porcentaje de humedad y no tuvieron inconveniente en desprenderla cuando el proceso osmótico lo requirió.



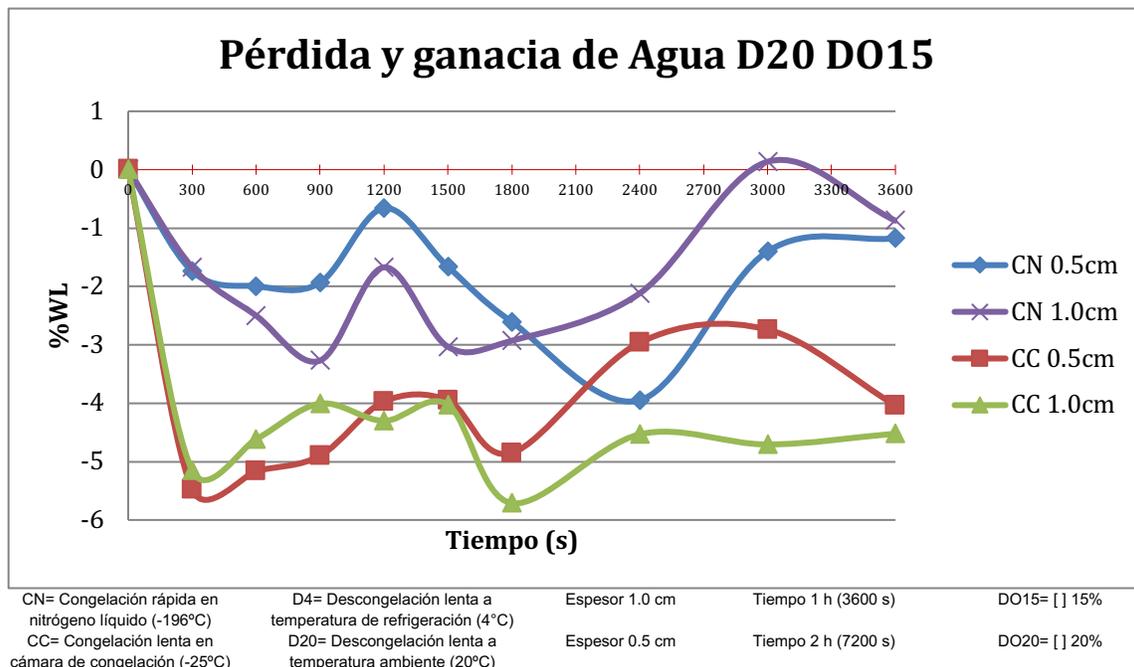
CN= Congelación rápida en nitrógeno líquido (-196°C)  
 CC= Congelación lenta en cámara de congelación (-25°C)  
 D4= Descongelación lenta a temperatura de refrigeración (4°C)  
 D20= Descongelación lenta a temperatura ambiente (20°C)  
 Espesor 1.0 cm  
 Espesor 0.5 cm  
 Tiempo 1 h (3600 s)  
 Tiempo 2 h (7200 s)  
 DO15= [ ] 15%  
 DO20= [ ] 20%

**Figura 15. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada en refrigeración**

El comportamiento cinético de pérdida de agua mostrado en la Figura 15, va de acuerdo con la gráfica de WL presentada por Dimakopoulou-Papazoglou y Katsanidis (2016), de deshidratación osmótica de carne en una solución al 20% de NaCl a 5°C. Por otro lado, cuando se realizó D4, no se observa una tendencia que muestre un efecto de la velocidad de congelación sobre la pérdida de agua. Sin embargo, las corridas CC 1.0 cm y CN 0.5 cm perdieron menos agua debido a que en éstas se introdujeron dos celdas de deshidratación para cumplir el tiempo de dos horas, contrario a CC 0.5 cm y CN 1.0 cm donde solo se introdujo una para una hora, lo que se cree no permitió el libre flujo de la solución en el sistema, causando una menor pérdida de agua a pesar de mantener la relación 80:1 en el proceso.

Ahora bien, el comportamiento de la humedad en la carne es diferente durante la ósmosis cuando ésta fue tratada con D20, de acuerdo con el objetivo 1, ésta produce más exudado cuando la fusión del hielo es rápida debido a que es mayor a la velocidad de absorción de la carne, y entonces, el agua no absorbida sale de la misma junto con otros componentes en forma de exudado.

En la Figura 16 se observa la diferencia en el comportamiento cuando se mantiene D20 y la concentración de la solución hipertónica al 15%. Ésta muestra una tendencia de valores negativos en la cinética de pérdida de agua, lo que quiere decir que todas las muestras ganaron agua durante el proceso osmótico. Cuando las muestras fueron descongeladas, el agua que perdieron en forma de exudado fue retenido por la toalla absorbente que se encontraba debajo de las mismas, por lo que no le se le dio tiempo a la carne de reabsorberla, y entonces, de acuerdo con González-Sanguinetti y col. (1985), las fibras del músculo quedaron deshidratadas en espera de estar en contacto con líquido para recuperarse.



**Figura 16. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 15% de carne descongelada a temperatura ambiente**

Cuando éstas entraron en contacto con la solución a una concentración cercana a limite de hidratación-deshidratación, recuperaron el agua perdida y además las proteínas de éstas, al hacer enlaces con los iones  $Cl^-$  aumentaron la repulsión entre los filamentos, lo que dejó espacio para que el agua se almacenara, la cual al ser una molécula polar pudo orientarse sola para hacer uniones como lo expresan Puolanne y Holanen, (2010).

A continuación, se puede ver la humedad inicial de cada muestra, la humedad máxima que tuvo la muestra en el proceso y la diferencia entre las dos anteriores que es el % de agua que ganó la muestra.

**Tabla 4. Porcentaje de exudado y humedades alcanzadas en el proceso osmótico, descongelación rápida, 15% NaCl**

	<b>% Exudado</b>	<b>% H inicial</b>	<b>%H máxima</b>	<b>% H Ganado</b>
<b>CN D20 0.5 cm</b>	11.26	66.54	70.08	3.54
<b>CN D20 1.0 cm</b>	11.85	66.10	70.40	4.30
<b>CC D20 0.5 cm</b>	15.06	63.70	68.72	5.02
<b>CC D20 1.0 cm</b>	15.71	63.21	69.11	5.90

CN= Congelación rápida en nitrógeno líquido (-196°C)	D4= Descongelación lenta a temperatura de refrigeración (4°C)	Espesor 1.0 cm	Tiempo 1 h (3600 s)	DO15= [ ] 15%
CC= Congelación lenta en cámara de congelación (-25°C)	D20= Descongelación lenta a temperatura ambiente (20°C)	Espesor 0.5 cm	Tiempo 2 h (7200 s)	DO20= [ ] 20%

La Tabla 4 muestra que la velocidad de congelación tuvo un efecto importante sobre el agua que ganó el músculo. Los valores concuerdan con la investigación de Hamm (1986), y explica que el tamaño de cristal depende de la velocidad de congelación, cuando es lenta, que en esta experimentación fue CC, generó cristales de gran tamaño que causaron un daño estructural que ya no les permitió a las proteínas mantener la humedad inicial.

Lo anterior se ve reflejado en el % de exudado, por ello, se tiene un valor del 11% con CN y 15% con CC, y en consecuencia podemos relacionar el resultado con la humedad inicial, final y la ganada. CN genera cristales pequeños, lo que genera un daño estructural mínimo y por lo tanto pierde menos humedad durante D20, que una muestra que funde cristales de gran tamaño a la misma velocidad.

Esto lleva a que su humedad inicial en el proceso osmótico sea de 66.54%, mas alta que la muestra con el tejido mas deteriorado que inicia con 63.70%, lo que quiere decir que sus fibras están menos deshidratadas y, por lo tanto, llega a una humedad máxima de 70.08%, otra vez mayor que la segunda que llegó a 68.72%.

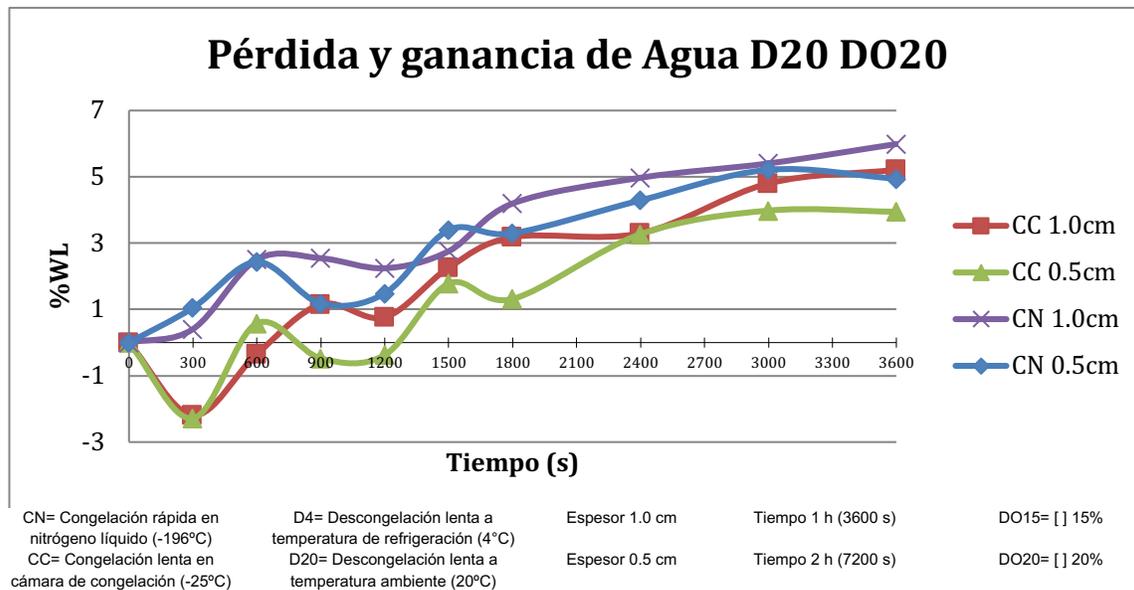
Sin embargo, cuando se obtiene la diferencia entre la humedad inicial y la máxima, la carne que inició y terminó con los menores valores de contenido de agua, fue la que mayor ganancia tuvo de ésta con 5.02%, mientras la otra, ganó el 3.54%. Entonces los resultados confirman que la carne puede reabsorber parte el agua que

perdió después de una descongelación, si se le da el tiempo que necesita para hacerlo como lo publicaron González-Sanguinetti y col. (1985).

Por otro lado, con base en la ganancia de líquido que tuvo la carne con daño estructural, se puede inferir que, en muestras de tamaño pequeño, no hay una desnaturalización de proteínas durante la descongelación, como lo publicó Hamm (1986). Y se explica con las conclusiones de Puolanne y Holanen (2010): el desdoblamiento de la estructura miofibrilar, que es la primera etapa de la desnaturalización, se comienza a dar cuando la concentración de NaCl, en el interior de la misma es de aproximadamente 1.4%.

Entonces, si Aliño y col. (2009) reportan una salinidad de  $0.013\% \pm 0.001\%$  en la carne fresca, por más concentración de sólidos que hubiera en las muestras durante la congelación, no alcanzaría el valor de 1.4%, por lo tanto, la pérdida de humedad durante la descongelación y la falta de capacidad de reabsorber toda el agua perdida solo es atribuida al daño estructural causado por los cristales generados durante la congelación.

Ahora bien, cuando se mantiene la velocidad de descongelación y se aumenta la concentración del proceso osmótico es obtenido un comportamiento como el mostrado en la Figura 17.



**Figura 17. Pérdida y ganancia de agua durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada a temperatura ambiente**

La Figura 17 permite observar que las muestras resultantes de CC, iniciaron ganando agua, mientras que de CN perdieron agua desde el inicio, esto tiene que ver con el agua perdida durante el exudado que fue captada por la toalla absorbente y no pudo ser recuperada, sin embargo, en esta ocasión, la velocidad de congelación y por ende el daño estructural, tienen un mayor efecto sobre el comportamiento del agua dentro de las fibras musculares.

Al igual que en la Figura 16, la congelación rápida generó un daño estructural mínimo y, por lo tanto, un menor exudado, lo que lleva a tener una muestra con mayor humedad inicial en la deshidratación osmótica, como lo indica la Tabla 5.

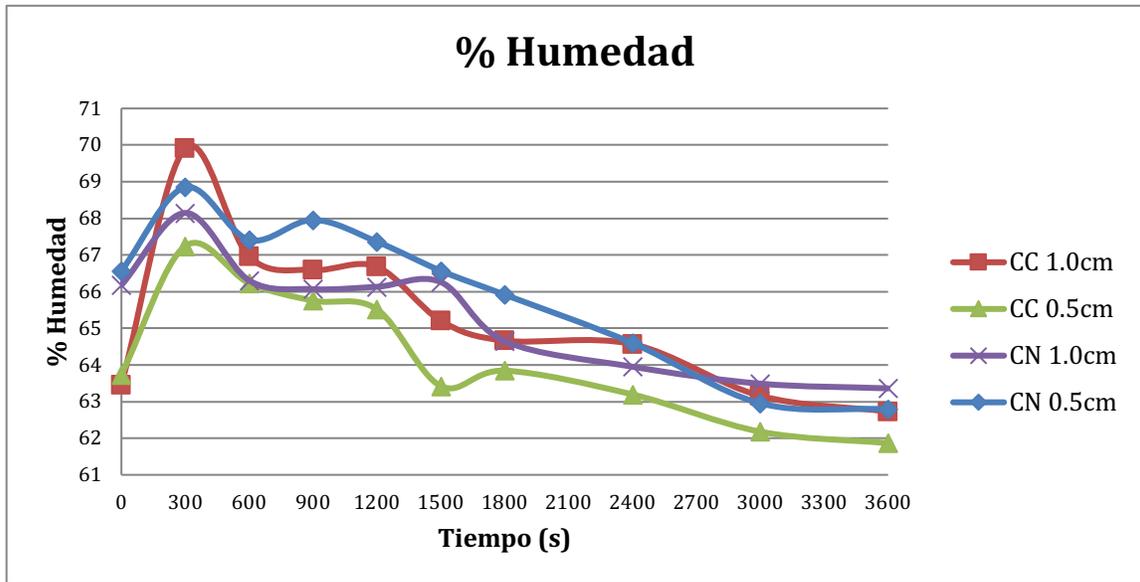
**Tabla 5. Porcentaje de exudado y humedades alcanzadas en el proceso osmótico, descongelación rápida, 20% NaCl**

NaCl 20%	% Exudado	% H inicial	%H máxima	Gramos agua inicial	Gramos agua máxima	Diferencia gramos de agua
<b>CN D20 0.5 cm</b>	11.24	66.56	68.84	0.765	0.753	0.012g
<b>CN D20 1.0 cm</b>	11.75	66.18	68.55	1.093	1.086	0.007g
<b>CC D20 0.5 cm</b>	15.01	63.73	67.89	0.679	0.703	-0.024g
<b>CC D20 1.0 cm</b>	15.38	63.45	69.91	0.741	0.767	-0.026g

CN= Congelación rápida en nitrógeno líquido (-196°C)  
 CC= Congelación lenta en cámara de congelación (-25°C)  
 D4= Descongelación lenta a temperatura de refrigeración (4°C)  
 D20= Descongelación lenta a temperatura ambiente (20°C)  
 Espesor 1.0 cm      Tiempo 1 h (3600 s)  
 Espesor 0.5 cm      Tiempo 2 h (7200 s)  
 DO15= [ ] 15%  
 DO20= [ ] 20%

La Tabla 5 muestra la relación que existe entre el % de exudado, el % de humedad inicial y máxima durante el proceso, donde se puede ver que al igual que en la Tabla 4, CC causa una mayor cantidad de exudado, una menor humedad inicial y una mayor ganancia de agua, si se considera la diferencia entre el % de humedad inicial y máxima, sin embargo, si se consideran solo esos valores, parece que todas las muestras ganan agua, como se muestra en la Figura 18.

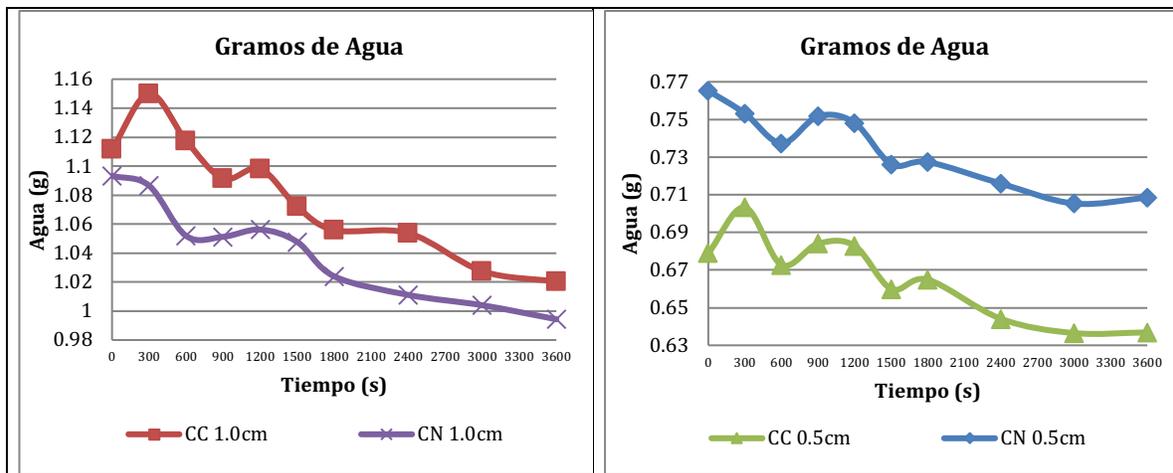
En la Figura 18 se observa que la humedad inicial en el tiempo 0 y la humedad máxima como el punto mas alto de la gráfica de comportamiento. Ésta muestra que, con base en el % de humedad, todas las muestras comienzan ganando agua y la pérdida de ésta se empieza a dar hasta los 1500 s, sin embargo, si se consideran los gramos de agua que representan cada porcentaje en la muestra, ya que el porcentaje depende de la masa total de la muestra, obtenemos la Figura 19.



CN= Congelación rápida en nitrógeno líquido (-196°C)      D4= Descongelación lenta a temperatura de refrigeración (4°C)      Espesor 1.0 cm      Tiempo 1 h (3600 s)      DO15= [ ] 15%  
 CC= Congelación lenta en cámara de congelación (-25°C)      D20= Descongelación lenta a temperatura ambiente (20°C)      Espesor 0.5 cm      Tiempo 2 h (7200 s)      DO20= [ ] 20%

**Figura 18. % Humedad durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada a temperatura ambiente**

En la Figura 19, donde se grafican los gramos de agua contra el tiempo, se visualiza que las muestras expuestas a CN perdieron agua desde el principio y las de CC, primero ganaron humedad y después comenzaron a perder. Lo anterior es congruente con la Figura 17 y con la Tabla 5.



CN= Congelación rápida en nitrógeno líquido (-196°C)      D4= Descongelación lenta a temperatura de refrigeración (4°C)      Espesor 1.0 cm      Tiempo 1 h (3600 s)      DO15= [ ] 15%  
 CC= Congelación lenta en cámara de congelación (-25°C)      D20= Descongelación lenta a temperatura ambiente (20°C)      Espesor 0.5 cm      Tiempo 2 h (7200 s)      DO20= [ ] 20%

**Figura 19. Gramos de agua durante la deshidratación osmótica al 20% de carne descongelada a temperatura ambiente**

Entonces, la ganancia de agua en las muestras con daño estructural se da por la deshidratación que las fibras sufrieron durante la descongelación, ya que éstas no pudieron rehidratarse debido a que no estuvieron en contacto con el exudado que se produjo por que éste fue captado por la toalla absorbente, así que, al entrar en la solución hipertónica, éstas comenzaron a recuperar la humedad que no se les había permitido. Sin embargo, la diferencia de presiones osmóticas que causa la concentración de 20% en la solución osmótica, provoca que las muestras menos perjudicadas comiencen a perder agua desde el inicio y que al final todas las muestras pierdan agua.

### 3.3.2 Coeficiente de difusión para NaCl

Para definir cuales son las condiciones en las que hay un mayor coeficiente de difusión y uno menor. Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante metodología Taguchi, en la Figura 20 se presenta la gráfica de efectos principales.

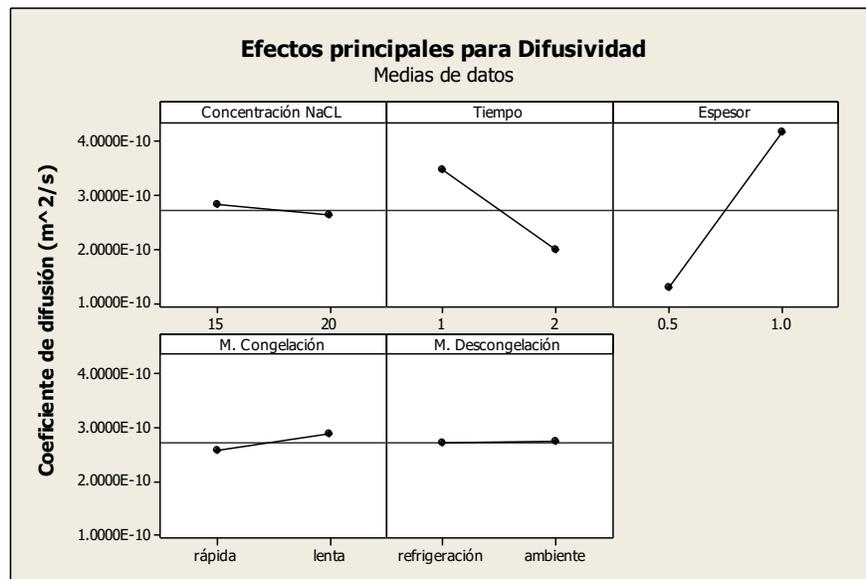
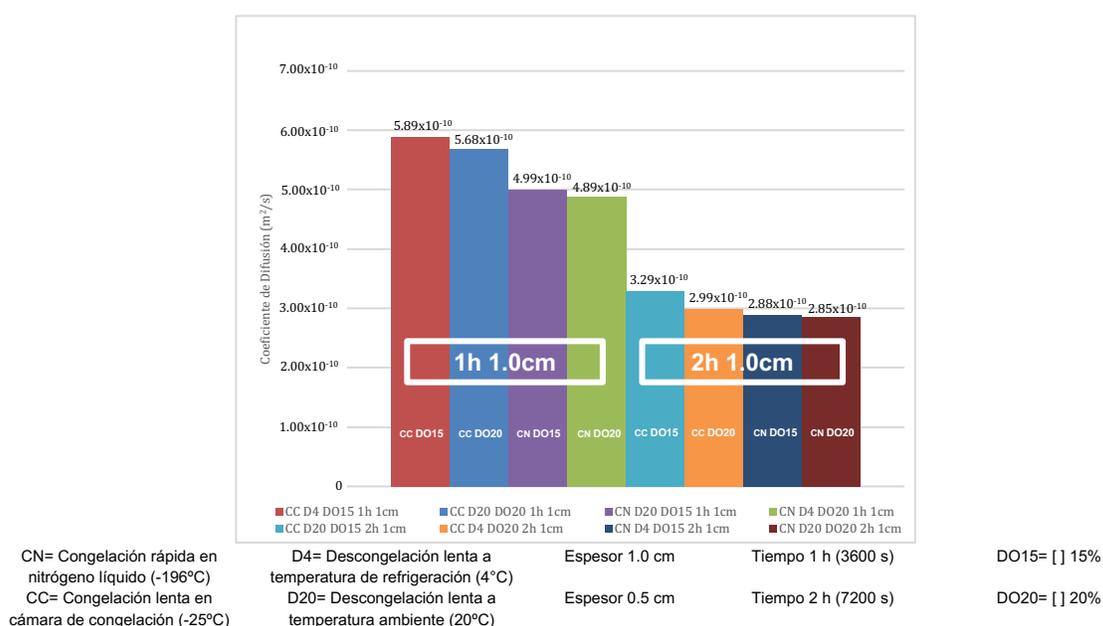


Figura 20. Gráfica de medias para coeficiente de difusión de NaCl

Se observa que las variables que más efecto tienen sobre el coeficiente son el espesor, seguido del tiempo de inmersión, la concentración de la solución osmótica, el método de congelación, y por último la descongelación que parece tener un efecto mínimo sobre el mismo.

Con base en la Figura 20, las corridas que tuvieron las variables que llevaron al coeficiente más alto y bajo, con base en el análisis estadístico son: la muestra que fue congelada en cámara (-25°C), descongelada en cámara (4°C), deshidratada osmóticamente a una concentración del 15% de NaCl durante 1 hora con un espesor de 1 cm (CC D4 DO15 1 h 1 cm) con un valor de  $5.89 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , y la muestra que fue congelada con nitrógeno líquido (-196°C), descongelada en cámara (4°C), deshidratada osmóticamente a una concentración del 20% de NaCl durante 2 horas con un espesor de 0.5 cm (CN D4 DO20 2 h 0.5 cm) con un valor de  $8.71 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectivamente.

A continuación, se hace una comparación gráfica de los resultados de coeficientes de difusión para las 16 corridas realizadas, separados en las Figuras 21 y 22 con base en el espesor, que de acuerdo con el análisis estadístico es la variable que más diferencia produce en los valores.

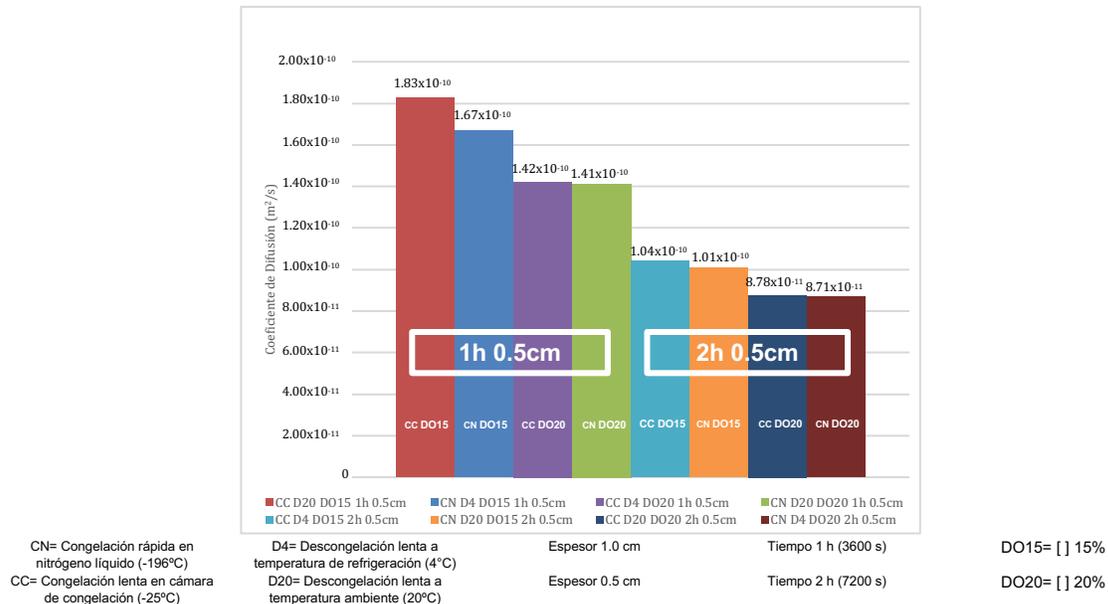


**Figura 21. Coeficientes de difusión para NaCl durante la deshidratación osmótica de carne con espesor de 1.0 cm, en un tiempo definido y pretratamiento de congelación-descongelación, con todas las variables en dos niveles**

Cuando el espesor es de 1 cm, como se presenta en la Figura 21, CC resulta en coeficientes altos, y la concentración de la solución osmótica al 20%, lleva a valores bajos de éste, además, el valor del resultado es muy similar entre las muestras que

fueron deshidratadas a diferentes concentraciones, cuando éstas fueron expuestas a CN, con valores de  $4.99 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s al 15% y  $4.89 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s al 20% con 1 h de proceso, mientras que con 2 h los valores son,  $2.88 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s y  $2.85 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s respectivamente.

Sin embargo, cuando el espesor se redujo a 0.5 cm, el comportamiento de la difusión no se mantuvo, las diferencias de éste se muestran en la Figura 22.



**Figura 22. Coeficientes de difusión para NaCl durante la deshidratación osmótica de carne con espesor de 0.5 cm, en un tiempo definido y pretratamiento de congelación-descongelación, con todas las variables en dos niveles**

Con un espesor de 0.5 cm que se muestra en la Figura 22, la variable que produce la diferencia más notoria en los resultados es la concentración, cuando ésta fue del 15%, obtuvimos los mayores resultados que fueron  $1.83 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para CC y  $1.67 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para CN con un tiempo de inmersión de 1 h, mientras que para 2 h fueron de  $1.04 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para CC,  $1.01 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para CN. Y a su vez, como en la Figura 20, CN favoreció a los coeficientes menores.

En general, CC junto con una deshidratación en una solución con una concentración del 15%, son las variables que favorecen a los valores altos en los coeficientes de difusión. Sin embargo, con un espesor de 1 cm, la variable que más efecto tiene.

sobre el resultado después del espesor y el tiempo, es la velocidad de congelación; y en el espesor de 0.5 cm es la concentración.

Graiver y colaboradores (2006), reportan valores de  $0.6 \times 10^{-10}$ ,  $1.1 \times 10^{-10}$ ,  $1.7 \times 10^{-10}$ ,  $1.85 \times 10^{-10}$  y  $5.0 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s en salado (NaCl) por ósmosis de carne de cerdo a 4°C, con concentraciones del 3, 7, 10, 14 y 20% respectivamente, la muestra fue cortada en cilindros de 1.5 cm de diámetro y 2 cm de espesor y sumergida por 180 min.

Sin Embargo, Djelveh y Gros (1988) obtuvieron resultados para salado osmótico de carne de res congelada y descongelada, de  $7.17 \times 10^{-10}$  y  $8.73 \times 10^{-10}$ , con una concentración del 10 y 20% a 25°C, señalan, que el aumento en sus resultados es debido a que el pretratamiento aumenta la difusión en el alimento, también reportan que el coeficiente aumenta conforme aumenta la temperatura, obteniendo resultados de 1.8 m<sup>2</sup>/s y 3.96 m<sup>2</sup>/s para temperaturas de 3.2 y 25.5°C respectivamente, en salado de carne de cerdo con una solución al 10%.

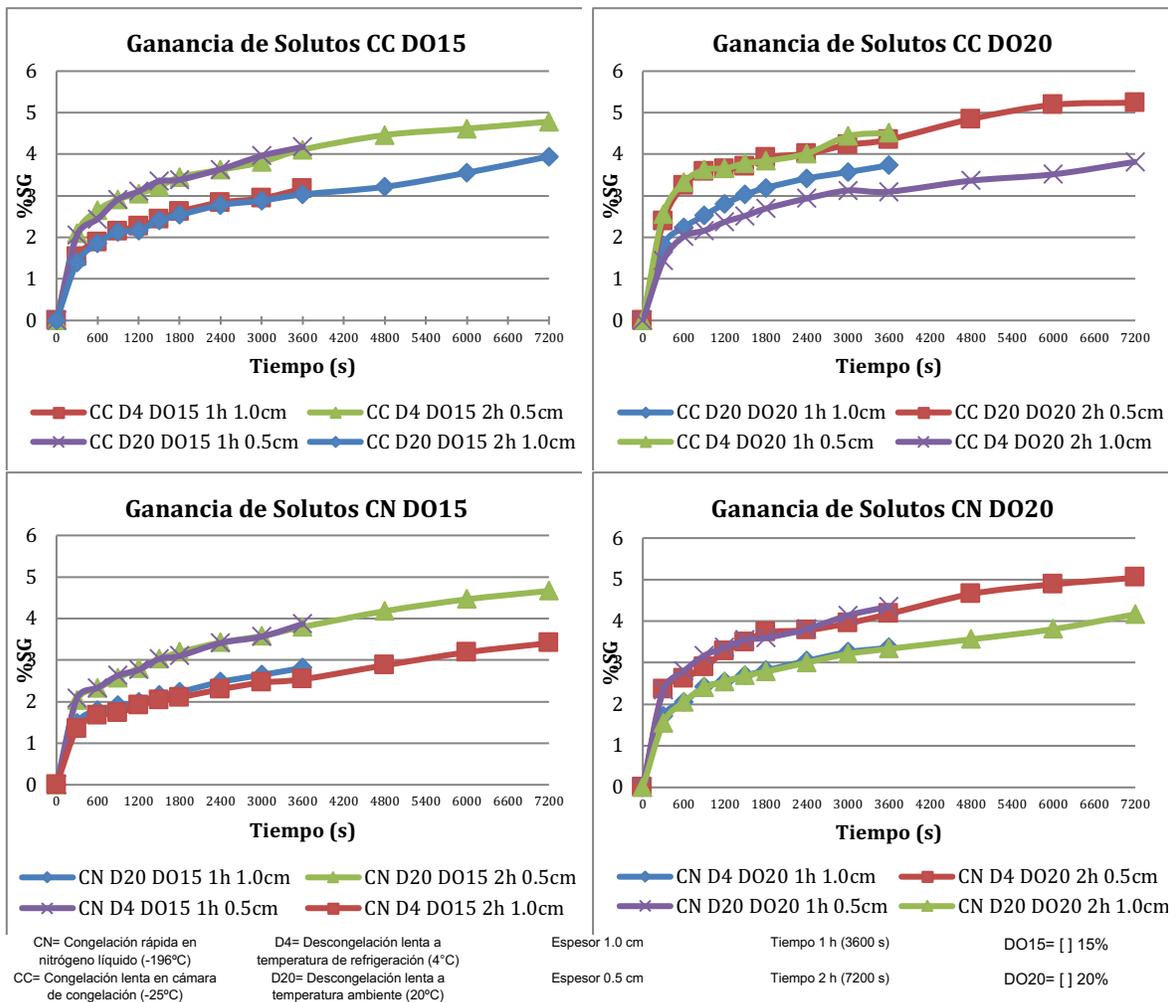
Según los mismos autores, sus colegas Robinson y Stokes publicaron en 1955 que, en soluciones homogéneas de NaCl, el coeficiente de difusión de sal disminuye de  $1.61 \times 10^{-9}$  a  $1.47 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s cuando la concentración aumenta de 0 a 3%, y después empieza a aumentar otra vez a  $1.57 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s cuando la concentración llega a 21.5%.

Los resultados están en el mismo intervalo que los reportados por Graiver y col. (2006), aún cuando, por la diferencia de espesor, se deberían haber obtenido valores menores, sin embargo, las muestras fueron pretratadas con congelación y descongelación, y de acuerdo con investigación de Djelveh y Gros (1988), el coeficiente de difusión aumenta cuando proceso osmótico es precedido por este pretratamiento. Además, según los mismos autores, sus colegas Robinson y Stokes, encontraron que conforme aumenta la concentración de NaCl, el valor del coeficiente disminuye, hasta llegar a una concentración del 21.5%, donde vuelve a aumentar. Por lo tanto, el conjunto de investigaciones anteriores justifica los resultados de esta investigación.

### 3.3.3 Ganancia de Solutos

El Coeficiente de difusión de NaCl en la carne, es el resultado de la ganancia de solutos que hubo durante el proceso osmótico y para esto realizamos la cinética de deshidratación osmótica.

En este caso, se presenta en %SG, que es el porcentaje de ganancia de solutos. Al igual que con las curvas en el coeficiente de difusión, primero se mantuvieron la velocidad de congelación y la concentración constantes para tener una mejor comparación.

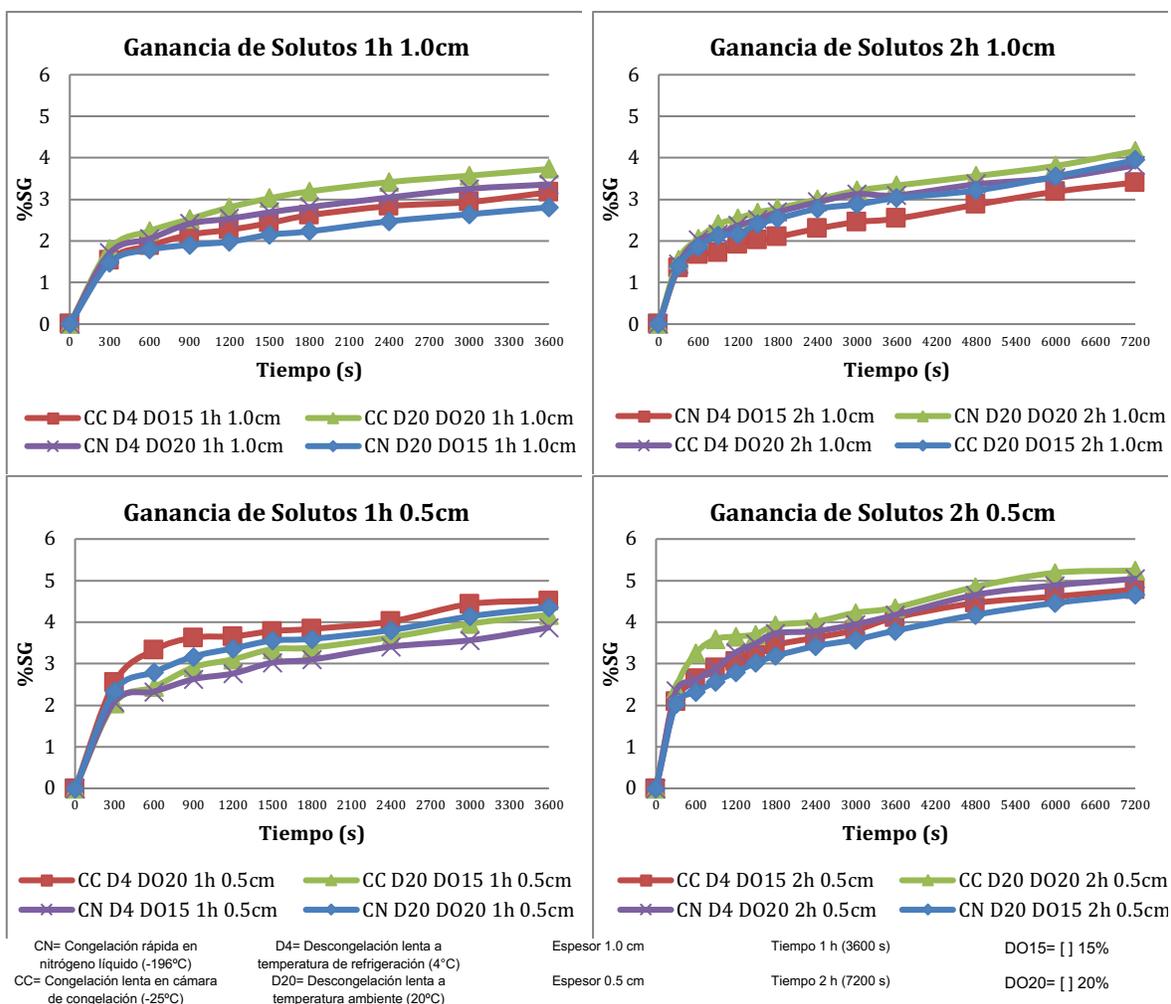


**Figura 23. Ganancia de solutos con congelación y concentración constantes**

En la Figura 23 se observa que si se mantienen el espesor, la velocidad de congelación y la concentración de deshidratación constantes, las curvas de

ganancia tienen un comportamiento semejante en el intervalo de 1 h, lo que permite inferir que el método de descongelación no tiene efecto sobre la ganancia de solutos.

Además, el efecto más notorio sobre el resultado es el del espesor, donde, se obtiene una mayor ganancia con 0.5 cm. Para analizar la intervención de las demás variables, se mantuvieron el espesor y el tiempo constantes en la Figura 24.



**Figura 24. Ganancia de solutos, espesor y tiempo constantes**

Las gráficas de la Figura 24 muestran que la concentración es la variable que tiene más efecto en el resultado, las dos líneas superiores de las cuatro comparaciones corresponden a la inmersión de la muestra en una solución con 20% de NaCl y las dos inferiores corresponden a la del 15%. Ahora bien, para cada concentración la

curva superior corresponde a la CC, lo que denota que la cristalización lenta favorece a una mayor ganancia de solutos.

A su vez, en el espesor de 0.5 cm las curvas están más juntas que en el espesor de 1.0 cm, lo que quiere decir que las diferencias que provocan tanto la concentración como la velocidad de congelación son menores en éste.

Ahora bien, si se relacionan los resultados de ganancia de solutos con los de coeficiente de difusión se puede analizar el efecto que cada variable tiene sobre los mismos.

### **a) Espesor**

Tanto en las curvas para determinar el coeficiente como en las gráficas de ganancia de solutos, se observa que el espesor de 0.5 cm es el que tiene una mayor ganancia de solutos en porcentaje, porque tanto  $\left(1 - \frac{M_t}{M_\infty}\right)$  como %SG son una fracción adimensional. Sin embargo, a pesar de ser el que mayor ganancia tiene, es el que obtiene los resultados más bajos de coeficiente.

De acuerdo con Crank (1975), el coeficiente de difusión se define como la velocidad de transferencia de una sustancia que se difunde a través del área de una sección que divide un gradiente de concentración. Esto es cuando se asume que la difusión se da en una sola dirección. Lo anterior se representa en la primera ley de Fick (1).

Si se despeja el coeficiente de difusión en la primera ley de Fick, se obtiene

$$-D = \frac{F dx}{dC} \quad (25)$$

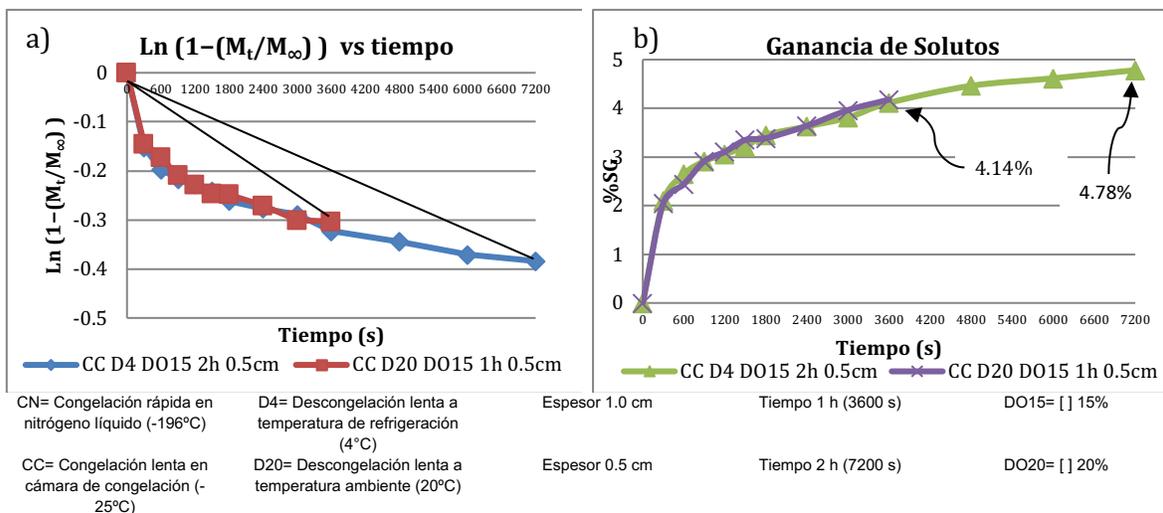
Donde se confirma que el coeficiente de difusión es la velocidad de difusión (F) que se da a través de un espesor (dx) que está entre un gradiente de concentración (dC).

Así, se explica que el espesor es directamente proporcional al coeficiente de difusión cómo se muestra en las Figuras 21 y 22. Además, una ganancia de solutos en una muestra pequeña representa un mayor porcentaje que en una muestra mayor.

## b) Tiempo

El tiempo es una variable que tiene efecto sobre la ganancia de solutos, la mayor ganancia se da durante la primera hora como se ve en la Figura 23, además, en este intervalo, el comportamiento de la curva de ganancia de solutos es similar cuando las variables son iguales sin tomar en cuenta la velocidad de descongelación. Sin embargo, el tiempo es una variable determinante para el coeficiente de difusión.

De la gráfica de la ecuación 20 que se muestra en la Figura 25a, obtuvimos el valor de la pendiente y con ese valor obtuvimos el resultado del coeficiente. De acuerdo con la ecuación (24), el coeficiente de difusión es directamente proporcional al valor de la pendiente, y como podemos ver en la Figura 25a, donde se colocó una línea recta entre el punto inicial y el final, la pendiente es mayor para el tiempo de una hora que en el de dos como se puede ver en las Figuras 21 y 22. Los gráficos comienzan en cero debido a que la concentración inicial de NaCl en la carne era éste.



**Figura 25. Comparación entre a) curvas para determinar el coeficiente de difusión y b) curvas de ganancia de solutos**

Cómo se sabe, la fuerza impulsora de la transferencia de masa en el proceso osmótico es el desequilibrio que se produce en el sistema por las diferencias de concentración. Durante la primera hora el desequilibrio es mayor y la ganancia de

solutos en la muestra es mayor, como se ve en la Figura 25b, y durante la segunda hora, la ganancia ya es menor por lo que la velocidad de la transferencia se ve reducida y por lo tanto el coeficiente.

En la Figura 25b se visualiza que durante la primera hora las dos muestras ganaron en promedio 4.14% de solutos, mientras que durante la segunda solo 0.64% más. Por lo que durante la primera hora es donde se llevó a cabo la mayor parte de la difusión y, en consecuencia, es el tiempo que da los mayores valores en el coeficiente.

### **c) Concentración**

Esta variable da comportamientos diferentes entre la ganancia de solutos y el coeficiente de difusión. En el primero, una concentración del 20% da un mayor porcentaje adquirido, mientras que, en el segundo, la de 15% favorece a los valores mayores del coeficiente.

De acuerdo con Vestergaard, Andersen, y Adler-Nissen (2007) cuando la carne se sumerge en una solución osmótica de NaCl, las miofibrillas se hinchan debido a la repulsión que causa el ion cloruro entre los filamentos, lo que causaría una retención de agua, sin embargo, el agua sale por la diferencia de presiones osmóticas. Lo anterior junto con la desnaturalización de proteínas al hacer enlaces con el NaCl, provoca una solución intracelular más concentrada debido al aumento de la de sal en ella. Ésto aumenta con la concentración de la solución hipertónica y explica el porque se tiene una mayor ganancia de solutos con una mayor concentración.

La fuerza impulsora del proceso osmótico es la diferencia concentraciones. Según la solución para la segunda ley de Fick de Crank (1975), para placa plana con difusión en una sola dirección dentro de una solución a concentración constante (Ecuación 9), la velocidad de difusión es la fracción entre la concentración de NaCl al tiempo  $t$  y al tiempo infinito, donde se considera que se llega al equilibrio. El valor al equilibrio es el mismo que el del proceso osmótico, debido a que la proporción entre la muestra y la solución es 80 a 1 m/m, para procurar que no exista dilución de la misma.

Por lo que, la gradiente de concentración es mayor cuando tenemos 20% en la ósmosis, esto quiere decir que el desequilibrio y la fuerza impulsora es mayor, sin embargo, la ganancia de solutos no es proporcional al aumento de la fuerza impulsora.

Si el gradiente de concentración aumenta un 33.33% al ir del 15 al 20%, la ganancia de solutos también debería aumentar en el mismo porcentaje para mantener el mismo valor en el coeficiente, sin embargo, la Tabla 7 muestra lo contrario.

En la Tabla 7 se observa que el aumento en la ganancia de solutos cuando se cambia la concentración del 15 al 20% no es proporcional al aumento de la concentración, es decir, en la concentración se tiene un aumento del 33.3%, por lo que se esperaría un aumento a la par en la ganancia de solutos, pero el aumento es menor, y por ello la concentración del 15% resulta en valores mayores del coeficiente.

**Tabla 7. Diferencia entre ganancia de solutos a los dos niveles de concentración**

	<b>%SG Final (15% NaCl)</b>	<b>%SG Final (20% NaCl)</b>	<b>%Diferencia</b>	
<b>CC 1 h 1.0 cm</b>	3.17	3.73	17.67	
<b>CC 2 h 1.0 cm</b>	3.94	4.49	13.96	
<b>CC 1 h 0.5 cm</b>	4.18	4.52	8.13	
<b>CC 2 h 0.5 cm</b>	4.78	5.45	14.02	
<b>CN 1 h 1.0 cm</b>	2.81	3.36	19.57	
<b>CN 2 h 1.0 cm</b>	3.41	4.16	21.99	
<b>CN 1 h 0.5 cm</b>	3.87	4.35	12.40	
<b>CN 2 h 0.5 cm</b>	4.66	5.04	8.15	
CN= Congelación rápida en nitrógeno líquido (-196°C)	D4= Descongelación lenta a temperatura de refrigeración (4°C)	Espesor 1.0 cm	Tiempo 1 h (3600 s)	DO15= [ ] 15%
CC= Congelación lenta en cámara de congelación (-25°C)	D20= Descongelación lenta a temperatura ambiente (20°C)	Espesor 0.5 cm	Tiempo 2 h (7200 s)	DO20= [ ] 20%

Lo anterior se da, ya que el aumento en la fuerza impulsora que produce el mayor gradiente de concentración no proporciona la ganancia de solutos esperada, por lo que, esto hace que el valor del coeficiente sea menor.

#### **d) Método de Congelación**

De acuerdo con Aursand, y col. (2009) el daño estructural que producen los cristales en la estructura de la carne durante la congelación crea espacios que permiten el flujo de agua dentro de ésta y, por lo tanto, también facilitan la entrada de la solución hipertónica a las fibras musculares, lo que resulta en una mayor área de contacto con la solución para una ganancia de solutos más homogénea.

Estas zonas también permiten que las miofibrillas se hinchen más por el efecto de repulsión que el cloruro tiene en ellas y absorban más agua con sal, que, a su vez, como refieren Vestergaard, Andersen y Adler-Nissen (2007), libera agua por la diferencia de actividad de ésta entre la muestra y el exterior, provocando que el agua dentro de la carne tenga una concentración más alta.

Ahora bien, como la facilidad que tiene la difusión y la magnitud de la hinchazón están relacionadas con el tamaño del daño estructural, se cree que esa es la razón por la cual CC provoca una mayor ganancia de solutos y un mayor valor en el coeficiente de difusión, al crear mayor daño estructural y por lo tanto mayores espacios, debido a la formación de cristales de mayor tamaño comparado con CN.

Finalmente, el método de descongelación, como se puede ver en las Figuras 20 y 23 no tiene intervención en la ganancia de solutos ni en el coeficiente de difusión, esto se debe a que la transferencia de solutos dentro de la carne está regida por el daño estructural de la congelación, y la descongelación rige la humedad de la muestra más no la cantidad de solutos.

## Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se concluye que los objetivos propuestos en el proyecto fueron concluidos satisfactoriamente.

En el objetivo particular 1 se determinó que una congelación en cámara ( $-25^{\circ}\text{C}$ ) combinada con una descongelación rápida a temperatura ambiente generan una mayor cantidad de exudado que una congelación con nitrógeno ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) y una descongelación en cámara ( $4^{\circ}\text{C}$ ). Por lo que se infiere que una congelación lenta causa un daño en la estructura proteica de la misma.

En el objetivo particular 2 se encontró que las muestras que fueron descongeladas a temperatura ambiente ganaron agua durante la deshidratación osmótica a una concentración del 15%, junto con las muestras que fueron congeladas en cámara ( $-25^{\circ}\text{C}$ ) y descongeladas de la misma manera que se introdujeron a una solución hipertónica la 20% que comenzaron ganando agua y después comenzaron a perder.

Para el caso del coeficiente de difusión, el valor más alto se obtuvo cuando la muestra fue congelada en cámara ( $-25^{\circ}\text{C}$ ), tuvo un espesor de 1 cm y fue deshidratada por 1 h a una concentración del 15%, mientras que los mayores valores de ganancia de solutos se obtuvieron cuando la muestra fue congelada en cámara ( $-25^{\circ}\text{C}$ ), con un espesor de 0.5 cm y fue deshidratada a una concentración del 20% durante 2 h.

Lo anterior da la oportunidad de manipular las condiciones de congelación y descongelación previas a la deshidratación osmótica, con el objetivo de optimizar los resultados de transferencia de masa esperados en el proceso.

# Bibliografía

- Ade-Omowaye, B., Taiwo, K., Eshtiaghi, N., Angersbach, A., & Knorr, D. (2003). Comparative evaluation of the effects of pulsed electric field and freezing on cell membrane permeabilization and mass transfer during dehydration of red bell peppers. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4, 177-188.
- Aliño, M., Grau, R., Baigts, D., & Barat, J. M. (2009). Influence of sodium replacement on the salting kinetics of pork loin. *Journal of Food Engineering*, 95, 551-557.
- Amerling, C. (2001). *Tecnología de la Carne*. Montes de Oca, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Añón, M. C., & Calvelo, A. (1980). Freezing rate effects on the drip loss of frozen beef. *Meat Science*, 4, 1-14.
- Aursand, I. G., Veliyulin, E., Böcker, U., Ofstand, R., Rustad, T., & Erikson, U. (2009). Water and Salt Distribution in Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Studied by Low-Field 1H NMR, 1H and 23Na MRI and Light Microscopy: Effects of Raw Material Quality and Brine Salting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 46-54.
- Barreiro Méndez, J. A., & Sandoval Briceño, A. J. (2006). *Operaciones de Conservación de Alimentos por Bajas Temperaturas*. Caracas: Editorial Equinoccio.
- Bello Gutiérrez, J. (2008). *Jamon Curado, Aspectos Científicos y Tecnológicos*. España: Diaz de Santos.
- Bevilacqua, A., Zaritzky, N. E., & Calvelo, A. (1979). Histological measurements of ice in frozen beef. *Journal of Food Science and Technology*, 14, 237-251.
- Castro-Giráldez, M., & Fito, P. (2010). Non-equilibrium thermodynamic approach to analyze the pork meat (*Longissimus dorsi*) salting process. *Journal of Food Engineering*, 99, 24-30.
- Chevalier, D., Le Bail, A., & Ghoul, M. (2000). Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part I. Freezing at atmospheric pressure. *Journal of Food Engineering*, 46, 277-285.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford, Inglaterra: Clarendon Press.
- Dalla Rosa, M., & Giroux, F. (2001). Osmotic treatments (OT) an problems related to the solution management. *Journal of Food Engineering*, 49, 223-236.
- Della Rocca, P. (2010). *Secado de alimentos por métodos combinados: Deshidratación osmótica y secado por microondas y aire caliente*. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Buenos Aires.
- Dimakopoulou-Papazoglou, D., & Katsanidis, E. (2016). Mass transfer kinetics during osmotic processing of beef meat using ternary solutions. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 560-569.

- Djelveh, G., & Gros, J. B. (1988). Measurement of Effective Diffusivities of Ionic and Nonionic Solutes through Beef and Pork Muscles using a Diffusion Cell. *Meat Science*, 23, 11-20.
- Egelandsdal, B., Mebre-Abie, S., Bjarnadottir, S., Zhu, H., Kolstad, H., Bjerke, F., Münch, D. (2019). Detectability of the degree of freeze damage in meat depends on analytic-tool selection. *Meat Science*, 152, 8-19.
- Ertbjerg, P., & Puolanne, E. (2017). Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: A review. *Meat Science*, 132, 139-152.
- Gallart-Jornet, L., Barat, J., Rustad, T., Erikson, U., Escriche, I., & Fito, P. (2007). Influence of brine concentration on Atlantic salmon fillet salting. *Journal of Food Engineering*, 80, 267-275.
- Gekas, V., Gonzalez, C., Sereno, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Mass Transfer properties of osmotic solutions. I. Water activity and osmotic pressure. *Internal Journal of Food Properties*, 1, 95-112.
- Gonzalez-Sanguinetti, S., Añon, M. C., & Calvelo, A. (1985). Effect of Thawing Rate on the Exudate Production of Frozen Beef. *Journal of Food Science*, 50, 697-700.
- Graiver, N., Pinotti, A., Califano, A., & Zaritzky, N. (2006). Diffusion of sodium chloride in pork tissue. *Journal of Food Engineering*, 77, 910-918.
- Guerrero, I., Hui, Y. H., & Rosimini, M. R. (2006). *Ciencia y Tecnología de Carnes*. Ciudad de México, México: Limusa.
- Hamill, R., & Botinestean, C. (2016). Meat: Structure and Composition. En B. Caballero, P. Finglas, & F. Toldra, *Encyclopedia of Food and Health*, 3, 701-710. Oxford: Academic Press.
- Hamm, R. (1986). Functional properties of the myofibrillar system and their measurements. En P. J. Bechtel, *Food science and technology, muscle as a food*, 135-199. Academic Press.
- Huff-Lonergan, E., & Lonergan, S. M. (2005). Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. *Meat Science*, 71, 194-204.
- Kayman-Ertekin, F., & Sultanoglu, M. (2000). Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 46, 243-250.
- Keenan, D. F. (2016). Pork Meat Quality, Production and Processing on. En B. Caballero, P. M. Finglas y F. Toldrá, *Encyclopedia of Food and Health*, 419-431. Dublin: Academic Press.
- Kiani, H., & Sun, D.-W. (2011). Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 22, 407-426.
- Kowalska, H., Lenart, A., & Leszczyk, D. (2008). The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 86, 30-38.

- Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*, *91*, 93-98.
- Li, H., & Ramaswamy, H. (2005). Osmotic Dehydration. *Stewart Postharvest Review*, *1*, 1-9.
- Muguruma, M., Katayama, K., Nakamura, M. y Yamaguchi, M. (1987). Low-Temperature Osmotic Dehydration Improves the Quality of Intermediate Moisture Meats. *Meat Science*, *21*, 99-109.
- Ngapo, T. M., Babare, I. H., Reynolds, J., & Mawson, R. F. (1999). Freezing rate and frozen storage effects on the ultrastructure of samples of pork. *Meat Science*, *53*, 159-168.
- Norma Oficial Mexicana NOM-116-SSA1-1994, bienes y servicios. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Método por arena o gasa. (29 de Junio de 1995). *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México, Distrito Federal, México.
- Offer, G., & Trinick, J. (1983). On the mechanism of water holding in meat: the swelling and shrinkage of myofibrils. *Meat Science*, *8*, 245-281.
- Price, J. F., & Schweigert, B. S. (1971). *Ciencia de la Carne y de los Productos Cárnicos*. (A. M. Barrado, Trad.) Zaragoza, España: Acribia .
- Puolanne, E., & Holanen, M. (2010). Theoretical aspects of water-holding in meat. *Meat Science*, *86*, 151-165.
- Qi, J., Li, C., Chen, Y., Gao, F., Xu, X., & Zhou, G. (2012). Changes in meat quality of ovine (*Longissimus dorsi*) muscle in response to repeated freeze and thaw. *Meat Science*, *92*, 619-626.
- Rastogi, N., Raghavarao, K., Niranjan, K., & Knorr, D. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science and Technology*, *13*, 48-59.
- Rosenvold, K. y Andersen, H. J. (2003). Factors of significance for pork quality—a review. *Meat Science*, *64*, 219-237.
- Schmidt, F., Carciofi, B., & Laurindo, J. (2008). Salting operational diagrams for chicken breast cuts: Hydration-dehydration. *Journal of Food Engineering*, *88*, 36-44.
- Schmidt, F., Carciofi, B., & Laurindo, J. (2009). Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. *Journal of Food Engineering*, *91*, 553-559.
- Sagar, V. R., & Suresh, K. P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology*, *47*, 15-26.
- Siró, I., Vén, C., Balla, C., Jónás, G., Zeke, I., & Friedrich, L. (2009). Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. *Journal of Food Engineering*, *91*, 353-362.

- Soren, N. M., & Biswas, A. K. (2020). Chapter 2 - Methods for nutritional quality analysis of meat. En A. K. Biswas, & P. K. Mandal, *Meat Quality Analysis* , 21-36. Pradesh: Academic Press.
- Taiwo, K. A., Angersbach, A., Ade-Omowaye, B. I., & Knorr, D. (2001). Effects of Pretreatments on the Diffusion Kinetics and Some Quality Parameters of Osmotically Dehydrated Apple Slices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 2804-2811.
- Van der Sman, R., Van Dalen, G., Voda, A., & Duijster, A. (2013). Ice crystal interspacing in frozen foods. *Journal of Food Engineering*, 116, 622-626.
- Vestergaard, C., Andersen, B. L., & Adler-Nissen, J. (2007). Sodium diffusion in cured pork determined by <sup>22</sup>Na radiology. *Meat science*, 76, 258-265.
- Volpato, G., Michielin, E., Ferreira, S., & Petrus, J. (2007). Kinetics of the diffusion of sodium chloride in chicken breasts (*Pectoralis major*) during curing. *Journal of Food Engineering*, 79, 779-785.
- Xia , X., Kong, B., Xiong, Y., & Ren, Y. (2010). Decreased gelling emulsifying properties of myofibrillar protein from repeatedly frozen-thawed porcine longissimus muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation. *Meat Science*, 85, 481-486.
- Xiong, Y. L. (2005). Role of myofibrillar proteins in water-binding in brine enhanced meats. *Food Research International*, 38, 281-287.
- Zhang, Y., & Ertbjerg, P. (2019). On the origin of thaw loss: Relationship between freezing rate and protein denaturation. *Food Chemistry*, 299, 1-8.

## **Páginas electrónicas**

- Gelambi, M. (Diciembre de 2019). *Actina: características, estructura, filamentos, función*. Obtenido de Liferder: <https://www.liferder.com/actina/>
- Hernandez Gil, R. (Marzo de 2007). *Relaciones hídricas en las plantas*. Obtenido de Libro Botánica On Line: <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/relahid/>
- Lureña, M. (Noviembre de 2013). *¿Por qué algunos filetes pierden tanta agua?* Obtenido de Gominolas de petroleo: [http://www.gominolasdepetroleo.com/2013/11/por-que-algunos-filetes-pierden-tanta\\_15.html](http://www.gominolasdepetroleo.com/2013/11/por-que-algunos-filetes-pierden-tanta_15.html)
- Villatoro, F. (Abril de 2016). *La congelación magnética de alimentos*. Obtenido de La ciencia de la mula francis: <https://francis.naukas.com/2016/04/26/35881/>