



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

**Determinación de la fracción  
volumétrica de la escarcha para  
analizar su comportamiento en placa  
metálica y carne.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

**Alberto Colin Calvillo**

Asesores:

Dra. Rosalía Meléndez Pérez  
Dr. José Luis Arjona Román

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

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

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

**Determinación de la fracción volumétrica de la escarcha para analizar su comportamiento en placa metálica y carne.**

Que presenta el pasante: **Alberto Colín Calvillo**

Con número de cuenta: **310694412** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

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

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 24 de Abril de 2018.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	
<b>VOCAL</b>	I.A. María Guadalupe López Franco	
<b>SECRETARIO</b>	M. en C. Julieta González Sánchez	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Maritza Rocandio Pineda	
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Jonathan Coria Hernández	

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

LMCF/javg

## Dedicatorias

A mis padres, Alberto Colin e Illiana Calvillo, no hay forma de darles las gracias por todo lo que han hecho por mi, lo que soy es por ustedes, me formaron, me instruyeron y educaron. Si es como dicen que los hijos escogemos a los padres, hice una excelente decisión. Pa siempre has sido mi héroe, te admiro y espero poder ser un poco del buen hombre que tu eres, te quiero. Ma, haces todo por nosotros, admiro tu paciencia y la madre y mujer que eres, gracias por darme la vida, te quiero. Este trabajo es una pequeña forma de agradecerles.

Hermana querida, Dani Colin, gracias por todo, por tu ayuda y por todo lo que hemos compartido, se que siempre puedo contar contigo así como tu conmigo. Te quiero.

A mis abuelos, Augusto Colin, Felipe Calvillo y Lucila Osuna, aunque no los conocí siempre pienso en ustedes, gracias a ustedes tengo a mis papás.

Ernestina Manilla, contigo tuve el placer de convivir mucho, te agradezco todo y gracias por ser mi abuelita, me hubiera encantado compartir esto contigo.

A mi tía Claudia Horta y a mi tío Arturo Colin por su apoyo y cariño.

A mi familia Colin y Calvillo, cada uno forma parte importante de mi vida.

Alejandra Aguirre, conocerte fue maravilloso, la universidad y la vida tomaron un rumbo diferente desde que te conocí, tomé decisiones que no hubiera tomado de no ser por ti y tu apoyo, gracias por todo lo que hemos pasado juntos.

A mis amigos Sergio Fernández, Tecutli Martínez, Rubén Delgadillo y Rafael Rolli.

## Agradecimientos

A la Dra. Rosalía Meléndez, por su paciencia, por las pláticas, por compartirme el gusto por este tema y por creer en mí para poder realizar este proyecto. No hay forma de agradecer toda su ayuda.

Dr. José Luis Arjona, por la ayuda y las enseñanzas, sin duda la ingeniería se vuelve más interesante gracias a usted.

Dra. Marta Rosas, por sus conocimientos, su paciencia, su ayuda y las risas a pesar de conocerla el último semestre.

M. en C. Jonathan Coria aunque no fuiste directamente mi maestro, siempre contaba con tu ayuda.

A mis sinodales I.A. María Guadalupe López, M. en C. Julieta González e I.A. Maritza Rocandio por su tiempo y ayuda.

A la Universidad Nacional Autónoma de México porque siempre fue un deseo pertenecer a esta institución y tuve el placer.

A mis maestros de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de todos aprendí algo.

A mis amigos de la universidad Andrés Anaya, Mara Piñón, Aarón Landa, Brenda Vargas y Sergio Aranda, porque hicieron el proceso más sencillo y más divertido

A DGAPA-UNAM por el apoyo financiero a los proyectos PAPIIT IT 201417 y a PIAPI 1620.

Parte de este trabajo se presentó en el XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos (CIBIA 2017).

## Índice

Resumen .....	I
Introducción .....	III
Capítulo 1 Antecedentes	
1.1 Congelación y formación superficial de escarcha en alimentos.....	1
1.2 Congelación en alimentos .....	1
1.3 Escarcha.....	6
1.3.1 Procesos de formación de escarcha.....	7
1.3.1.1 Primer proceso de formación.....	8
1.3.1.2 Segundo proceso de formación.....	10
1.3.2 Escarcha en alimentos y el modelo de fenómeno de superficie .....	14
1.3.3 Propiedades termofísicas de la escarcha.....	16
1.4 Tipos de Agua.....	22
1.5 Análisis Térmico.....	23
1.6 Carne de cerdo.....	26
Capítulo 2 Metodología Experimental	
2.1 Metodología experimental.....	30
2.2 Características de materia prima.....	31
2.3 Congelación criogénica.....	31
2.4 Espesor de escarcha.....	32
2.5 Fracción volumétrica.....	34
2.6 Cálculo de las propiedades de la escarcha.....	36
2.7 Calorimetría Diferencial de Barrido Modulada (MDSC) .....	36
Capítulo 3. Análisis y Discusión de Resultados	
3.1 Fracción volumétrica de hielo en metal.....	38
3.2 Conductividad térmica de la escarcha en metal.....	40
3.3 Densidad de la escarcha en metal.....	42
3.4 Escarcha en la carne de cerdo.....	43

3.5 Espesor de la escarcha en la carne de cerdo.....	45
3.6 Conductividad térmica de la escarcha en carne de cerdo.....	46
3.7 Densidad de la escarcha en carne de cerdo.....	48
3.8 Cambios Cinéticos y estructurales de diferentes tipos de agua y de escarcha .....	49
Conclusiones.....	55
Referencias Bibliográficas .....	56

## Índice de Figuras

Figura 1. Curva de congelación de distintos materiales (Orrego, 2008).....	3
Figura 2. Crecimiento y densificación de la escarcha (Kandula, 2011).....	8
Figura 3. Representación en carta psicrométrica del punto de rocío (Treybal,1980) .....	10
Figura 4. Proceso de la formación de escarcha en una carta psicrométrica (Piucco <i>et al</i> , 2008).....	11
Figura 5. Crecimiento de las estructuras de escarcha (Hermes <i>et al</i> , 2009).....	12
Figura 6. Formación de estructuras de hielo a distintas temperaturas (Nelson, 2011).....	13
Figura 7. Variación del espesor en función del tiempo (Mannapperuma y Singh, 1987).....	14
Figura 8. Perfil de temperaturas de un experimento MDSC (Thomas, 2005a).....	24
Figura 9. Flujo de calor total, reversible y no reversible (Verdonck,1999).....	25
Figura 10. Estructuras que componen a un músculo (Dorado, 2011). .....	27
Figura 11. Quemadura por frio y deshidratación en carne (Schmidt, 2009).....	28
Figura 12. Diagrama experimental.....	30
Figura 13. a) acomodo de los cortes de carne en la placa.....	32
b) Placa dentro del recipiente de nitrógeno.....	32
Figura 14. Toma de imágenes en el esteromicroscopio LEICA.....	33
Figura 15. Traslape de imágenes en Photoshop.....	33
Figura 16. Imagen para la determinación de la relación matemática.....	34
Figura 17. Traslape de dos imágenes de carne para determinar el espesor.....	35
Figura 18. Traslape de dos imágenes de carne para determinar la fracción volumétrica.....	35
Figura 19. Acomodo de las charolas en el calorímetro.....	37
Figura 20. Variación de la fracción volumétrica en metal.....	39
Figura 21. Variación del espesor de la escarcha en metal.....	40
Figura 22. Variación de la conductividad térmica en metal.....	41
Figura 23. Comportamiento de la densidad con las ecuaciones de distintos autores.....	42

Figura 24. Variación de la fracción volumétrica en la carne de cerdo.....	44
Figura 25. Variación del espesor en la carne de cerdo.....	45
Figura 26. Variación de la conductividad térmica en la carne de cerdo.....	47
Figura 27. Densidad propuesta por Gatica en carne de cerdo.....	48
Figura 28. Termograma de flujo de calor de diferentes aguas.....	49
Figura 29. Termograma de los cambios en Cp de distintas muestras.....	53

### Índice de Tablas

Tabla 1. Ecuaciones empíricas de las propiedades termofísicas de la escarcha...17	17
Tabla 2. Valores de temperaturas y entalpia de fusión de distintos materiales.....	52

## Resumen

La escarcha se forma debido a que la humedad del ambiente se deposita en una superficie, este fenómeno sucede porque la superficie esta a una temperatura más baja que el punto de congelación del agua y más baja que el punto de rocío. Generalmente la escarcha es un inconveniente en la industria de los alimentos porque genera cambios en olor y sabor (Kobs, 1997).

La formación de escarcha se hizo mediante contacto indirecto en el caso de la carne de cerdo e inmersión en la placa metálica, ambos con nitrógeno líquido. Después se descongeló a temperatura ambiente, durante este proceso se tomaron micrografías cada minuto con un estereomicroscopio Leica EZ4D y se midieron las condiciones ambientales como humedad relativa con un psicrómetro Extech HD500 y la temperatura superficial con un termómetro infrarrojo Cole Parmer 39650-3.

Para la determinación del espesor y la fracción volumétrica de hielo se traslapaban las imágenes mediante Adobe Photoshop, donde el fondo era el material sin escarcha y sobre esta imagen se sobreponía otra donde si había escarcha visible.

Otras variables como la densidad, la conductividad térmica y el coeficiente de difusión se determinaron mediante ecuaciones empíricas planteadas por distintos autores como Gatica *et al.* (2009), Hayashi *et al.* (1977) y Sahin (2000).

También se realizó una prueba de calorimetría diferencial de barrido (MDSC) de distintas muestras de agua para analizar la diferencia con el agua obtenida de escarcha. Donde se obtuvieron resultados de espesor máximo en la carne de cerdo de 0.8 mm y de 1.4 mm en la placa metálica. A una temperatura de  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una fracción volumétrica de 1, se obtiene una densidad de  $919.42\text{ kg/m}^3$ . En el caso de la calorimetría para el agua destilada se obtiene una entalpía de  $277.2\text{ J/g}$  y de  $272.8\text{ J/g}$  para la escarcha.

Se concluye que las ecuaciones utilizadas solo consideran la temperatura superficial, la porosidad y otras condiciones ambientales, pero no consideran el material donde se forma la escarcha.

## Introducción

Para poder consumir algunos alimentos como carne, pescado y algunas frutas es necesario conservarlos, ya que en muchas ocasiones no es posible adquirirlo fresco debido a complicaciones de traslado.

Algunos métodos de conservación son la refrigeración y la congelación, estos involucran una disminución en la temperatura del producto. En el caso de la congelación se alcanzan temperaturas menores que en la refrigeración.

Un problema muy común que sufren los productos congelados es la formación de escarcha. La mayoría de los estudios relacionados son en superficies metálicas, esto debido a que, en los congeladores tanto caseros como en instalaciones industriales se deposita escarcha en los evaporadores, lo que genera que se disminuya la eficiencia del equipo. Los autores que han hablado de este tema desarrollaron ecuaciones para explicar algunas propiedades como la densidad, la conductividad térmica y los coeficientes de difusión másica.

En el caso de escarcha en alimentos, los estudios son escasos, se habla de los daños que puede ocasionar en el alimento, como pueden ser cambios en color, olor, sabor, deshidratación del producto, entre otros.

Una variable importante es la fracción volumétrica de hielo, a esta se le considera poco en los estudios, pero desarrolla un papel importante, debido a que afecta a las propiedades de la escarcha como la conductividad térmica y densidad. Por esto se midió la fracción volumétrica en distintas superficies como placa metálica y carne de cerdo, y se evaluaron las propiedades de la escarcha en ambos materiales.

# Capítulo 1

## Antecedentes

## **1.1 Congelación y formación superficial de escarcha en alimentos**

Cuando los alimentos son conservados en un congelador, crecen gradualmente cristales de hielo dentro del envase, cristales superficiales a los que se denomina *escarcha*; este fenómeno que tiene lugar, cuando la temperatura superficial del producto es menor a la temperatura de rocío del aire dentro del mismo envase. Laguerre y Flick, (2007), encontraron que en un congelador casero los ciclos de encendido y apagado del compresor contribuyen a fluctuaciones de la temperatura del aire que propician la formación de esta. Poovarodom *et al.* (1990) observaron que la pérdida de peso en carne molida se incrementa rápidamente con el tiempo de almacenamiento, 6% después de 9 meses a una temperatura de -20°C, después el peso se mantenía estable debido a la formación de una cobertura en la superficie del producto, una barrera para la sublimación del agua, que también era escarcha.

La escarcha es considerada como un medio poroso que está compuesta por hielo y aire, y sus efectos en los alimentos han sido poco estudiados, así mismo, se podría considerar que la humedad que la forma no solo se deposita en la superficie, también podría difundirse hacia el interior generando cambios en la misma escarcha como en el alimento. En el caso contrario, la humedad presente en el alimento podría migrar hacia la superficie y contribuir a la formación de la escarcha. En el caso de que la humedad migrara hacia el interior del alimento, esta podría interactuar con los componentes como carbohidratos y proteínas, lo que modificaría el espesor y sus propiedades termofísicas como la conductividad térmica y su capacidad calorífica.

## **1.2 Congelación en alimentos**

La congelación es el proceso de preservación originado por la reducción de la temperatura por debajo de aquella en la que se comienzan a formar cristales en un material alimenticio (Orrego, 2008).

Durante la congelación hay un primer proceso en el cual se verifica la eliminación del calor sensible por enfriamiento, posteriormente se retira el calor latente por el cambio de fase del agua y que es la porción energética más considerable. La inmovilización del agua en forma de hielo y el aumento de concentración de los solutos en el agua no congelada reduce la actividad de agua en alimentos (Fellows, 2000).

El descenso de temperaturas por debajo del punto inicial de congelación provoca la aparición de núcleos de cristalización en torno a los cuales va solidificando el resto del agua. El número y distribución de estos núcleos depende de la velocidad de congelación. Si la velocidad de remoción de calor es lenta, la solidificación del agua tiene lugar en torno a pocos núcleos que dan origen a cristales de hielo grandes que destruyen en proporción significativa el tejido del alimento. Mientras que si la velocidad de eliminación de calor es lo suficientemente rápida, la velocidad de nucleación aumenta ya que el agua llega a sub enfriarse y congelarse simultáneamente en muchas partes. En este caso la solidificación se produce en torno a microcristales que resultan inofensivos para la integridad de los tejidos y permiten preservar la textura de los alimentos (Heldman y Lund, 2007).

Cuando se habla de congelación es necesario tomar en cuenta lo que es la cristalización en donde se forman partículas sólidas a partir de una fase homogénea que depende de la velocidad de congelación y del grado del sub enfriamiento del sistema.

En la cristalización se pueden describir tres etapas:

- Nucleación: Es un proceso donde hay aparición de núcleos de hielo y antecede a la cristalización.
- Propagación o etapa de crecimiento de cristales: Se requiere que las moléculas puedan difundirse hasta la superficie de los núcleos cristalinos crecientes. Mientras que la cantidad de cristales de hielo aumenta, la temperatura del alimento disminuye, la concentración del soluto de la fase

no congelada aumenta llegando a cierta concentración máxima de solutos en la que la cristalización se detiene (Orrego, 2008). En esta etapa es en donde las moléculas de agua se mueven para alcanzar la estabilidad termodinámica como hielo hexagonal, el cual es el arreglo estructural favorecido energéticamente (Hobbs, 1974).

- Maduración o recristalización: Son los cambios físicos que se producen en los cristales de hielo cuando se vuelve a congelar (por ejemplo, cuando cambian de forma, tamaño y orientación) (Fellows, 2000).

La recristalización en otras palabras es el proceso en el cual, con el paso del tiempo, el promedio en el tamaño de los cristales de hielo aumenta y su número disminuye por efecto de la redistribución del agua desde los pequeños cristales de hielo (Orrego, 2008).

El proceso de congelación se describe en tres etapas como se observa en la Figura 1, donde la primer curva corresponde a agua pura y las siguientes conciernen a un alimento mediante congelación lenta y congelación rápida.

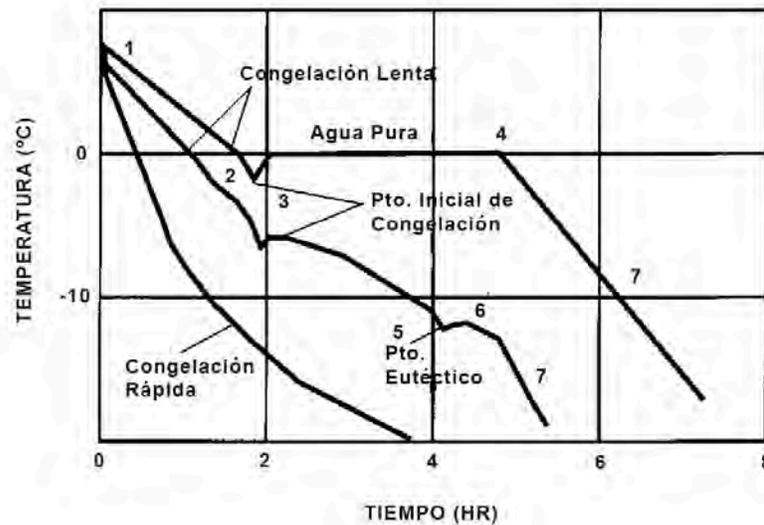


Figura 1. Curva de congelación de distintos materiales (Orrego, 2008).

- Precongelación, que es el período desde el inicio del enfriamiento hasta que comienza a cristalizarse el agua (1-2).
- Congelación, que es el período durante el cual, la temperatura (4) del material es más o menos constante (cambio de fase) si la sustancia es pura. Antes de iniciar la congelación puede existir un ligero sub enfriamiento (3) seguido de un incremento de temperatura hasta el punto de fusión o congelación del material. Para el caso de un alimento, que como una aproximación puede considerarse como una solución acuosa, la temperatura en la que comienzan a aparecer los primeros cristales de hielo ( $T_i$ ) está siempre por debajo de la del punto de fusión del agua.
- Se puede presentar un subenfriamiento como en el primer caso, pero el cambio de fase se hace con temperatura variable, cristalizando inicialmente sólo agua pura hasta un punto en el que se comienzan a formar los cristales del "soluto" (o del alimento o solución concentrada), lo que nuevamente causa un pequeño salto en la temperatura, (5), seguido por una "meseta" de congelación (6) que finaliza en un punto generalmente difícil de determinar, en donde se considera que el producto está completamente congelado.
- Luego que los materiales se congelan por completo, sigue un descenso de temperatura aproximadamente lineal (7), causado por el retiro de calor sensible del producto sólido, fase que concluye cuando el material alcanza la temperatura del medio refrigerante o congelador utilizado para el proceso (Orrego, 2008).

La velocidad con la que se realiza la congelación es muy importante. Si se reduce la temperatura con una velocidad lenta, los cristales de hielo serán grandes. La congelación lenta se conoce como el paso de la máxima cristalización por más de 30 minutos. El atributo de calidad que más se ve afectado es la textura, especialmente en productos donde el agua se encuentra contenida en la estructura celular, en estos casos, la formación de cristales grandes puede romper las paredes celulares y producir pérdidas de la estructura del producto que no se

recuperarán al descongelarlos (Heldman y Härtel, 1997).

La congelación rápida se efectúa normalmente en periodos inferiores a los 30 minutos, con descensos de temperatura entre 0.5 y 50 °C/min. Es un procedimiento muy utilizado para congelar alimentos envasados en paquetes pequeños (Barreiro y Sandoval, 2006).

La congelación ultra rápida se lleva a cabo mediante la aspersion o inmersión en refrigerantes criogénicos, como el nitrógeno líquido (LNF) y el dióxido de carbono, con temperatura de ebullición a presión atmosférica de -195.8°C y -98.3°C, respectivamente (Barreiro y Sandoval, 2006).

El nitrógeno líquido es incoloro y tiene diversas aplicaciones en la industria entre los cuales destaca la congelación de productos perecederos (González, 2013), en donde la deshidratación del producto es prácticamente nula.

La velocidad de congelación consigue que el producto mantenga una estructura celular muy próxima a la de su estado fresco, conservando sus propiedades sensoriales (González, 2013).

Al unir los efectos de la congelación con fluctuaciones de temperatura durante el almacenamiento en congelación, se contribuye a cambios mucho más drásticos en el sistema alimenticio, teniéndose una menor estabilidad térmica. Hansen *et al.* (2004) estudiaron el efecto de las fluctuaciones de la temperatura de proceso y de almacenamiento en congelación, sobre alteraciones físicas diferentes, relacionándolas con la capacidad para enlazar y distribuir el agua durante el proceso y en las modificaciones sobre compuestos grasos. El efecto de la temperatura ambiente y apertura de puertas puede considerarse una condición de uso real que existe en el entorno doméstico, que es relacionado con el consumo de energía y su relevancia en la eficiencia del equipo. Sin embargo, resalta la relevancia de la formación de escarcha en la superficie de los alimentos, en donde puede impartirse sabores desagradables y que está relacionada directamente con

las propiedades del aire, ya que de estas dependen variables como el espesor, la densidad y la conductividad térmica, entre otras.

### 1.3 Escarcha

La escarcha puede ser considerada como un medio poroso, compuesto por hielo lleno de aire, con una conductividad térmica baja, que actúa como un aislante, reduciendo la transferencia de calor (Kim *et al.*, 2009). En la industria de la refrigeración es muy conocida debido a que se acumula en los evaporadores, que son los encargados de retirar el calor dentro de una cámara de congelación que contiene al alimento a enfriar, el problema es que reduce la eficiencia de los equipos, "ya que bloquea el paso del aire e incrementa la resistencia térmica entre el aire y la superficie fría" (Qu *et al.*, 2006). Es por esto por lo que la mayoría de los estudios sobre escarcha han sido aplicados sobre placas metálicas. Fossa y Tanda (2010) realizaron un experimento de la formación en canales verticales por convección forzada. Hermes *et al.* (2009) realizaron un estudio del crecimiento y densificación en superficies planas; Qu *et al.*, (2006) estudiaron la formación local en una superficie fría y la morfología del hielo.

Cheng y Cheng (2011) citan que la formación de escarcha puede ayudar a minimizar la deshidratación de los alimentos al sellar la salida de los jugos o agua con agentes que propician sabor, debido a la formación de una corteza en la capa externa de un producto alimenticio, sin embargo esta práctica es común en productos del mar como peces y camarones que son sometidos a almacenamiento en congelación, actividad denominada como "Glaseado", y que es la formación de una delgada capa protectora de hielo que se forma en la superficie de un producto congelado al rociarlo con agua potable o al sumergirlo en ella con aditivos aprobados (Vanhaecke *et al.*, 2010).

Laguerre y Flick (2007) citan que a menudo, la formación de escarcha es acompañada por deshidratación superficial para determinados productos. Esta

deshidratación puede inducir a la modificación de color, el enranciamiento y pérdida de peso entre otras desventajas, este estudio se realizó en vegetales envasados y durante el almacenamiento. En cuanto a la formación de escarcha, se han desarrollado modelos teóricos y experimentales, empíricos y semiempíricos que consideran los efectos de la temperatura, velocidad y humedad relativa del aire, temperatura superficial del material sobre el espesor (Cheng y Shiu, 2002). Le Gall, *et al.* (1997), determinan la formación de escarcha en productos no alimenticios como son placas de cobre o aluminio con aplicación de campo eléctrico para eliminación de formación de escarcha (Wang *et al.*, 2004); en convección forzada y natural (Fossa y Tanda, 2010), en cilindro capilar (Lee y Ro, 2005), tanques criogénicos expuestos a condiciones atmosféricas (Kim *et al.*, 2009), asumiendo, en todos los casos la importancia de la transferencia de calor y masa en la formación de la misma.

La fase sólida tiende a variar su volumen en el tiempo, debido a la solidificación del vapor difundido en los poros, formados por los espacios dejados por la estructura arbórea de la escarcha producida. Si consideramos un poro, formado en el interior de la estructura arbórea del hielo, próximo a la superficie fría, veremos que con el tiempo quedará deficiente de vapor de agua, por su transformación en hielo en la superficie de la estructura antes mencionada. De esta forma, el vapor de agua en mayor concentración en las capas superiores de la escarcha y principalmente en la superficie, se difunde para suplir el desequilibrio provocado por la ablación (Gatica *et al.*, 2005).

### **1.3.1 Procesos de formación de escarcha**

En la literatura diferentes autores proponen distintos métodos de formación de escarcha que se mencionan a continuación.

### 1.3.1.1 Primer proceso de formación

La escarcha se forma cuando el aire húmedo entra en contacto con una superficie fría, cuya temperatura es más baja que la temperatura de congelación del agua (273 K), y más baja que el punto de rocío, por lo que el vapor de agua pasa directamente del estado gaseoso a un estado sólido (Kandula, 2011).

En el proceso de formación se identifican tres periodos:

- Periodo de crecimiento de cristales: caracterizado por un crecimiento unidimensional de los cristales, en dirección perpendicular a la superficie.
- Periodo de crecimiento de la capa de escarcha: cuando los cristales de escarcha interactúan con otros cristales, resultando en una capa uniforme.
- Periodo de pleno crecimiento de la capa de escarcha, cuando la superficie alcanza 0 °C y un periodo cíclico de fusión, congelación y deposición que ocurre hasta que la formación de escarcha se detiene (Hayashi *et al.*, 1977).

En la Figura 2, se muestra como durante la formación de escarcha, una parte de la masa total de flujo de vapor se difunde a través de la capa de escarcha, y experimenta una transformación de fase a hielo, que se deposita en los cristales existentes, resultando en una densificación del hielo (Kandula, 2011).

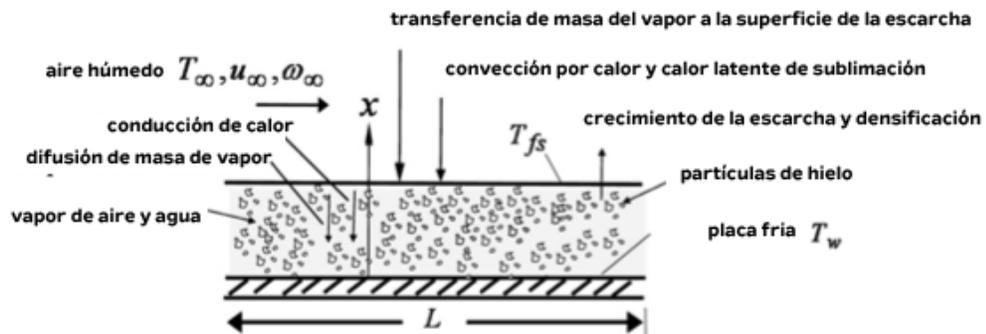


Figura 2. Crecimiento y densificación de la escarcha (Kandula, 2011).

Kandula (2011) explica que sobre la placa fría crece una capa de escarcha, en esta capa se asume que la difusión de masa y calor es en una sola dirección, perpendicular a la placa. La densidad y la conductividad térmica son independientes del espesor. La presión del aire es uniforme en toda la corriente de aire y dentro de la capa de escarcha, tanto los coeficientes de masa como el de calor se consideran constantes en la superficie. Los espacios donde hay aire son lo suficientemente pequeños para que la transferencia de calor por convección natural sea despreciable.

También se asume que en la superficie de la escarcha el vapor de agua está saturado, aunque hay estudios como el de Na y Webb (2004) donde se indica que el vapor de agua esta sobresaturado y no saturado.

- La humedad es un término utilizado para describir la presencia de vapor de agua, ya sea a la intemperie, o dentro de un espacio.
- La humedad relativa (*HR*), es un término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra. La humedad relativa se expresa en porciento, tal como 50, 75, 30%, etc. Se le conoce como temperatura de bulbo seco a la temperatura indicada en la escala de un termómetro común (Díaz y Barreneche, 2005).
- La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor-gas no saturada.
- El punto de rocío es la temperatura a la cual una mezcla vapor-gas se satura cuando se enfría a presión total constante sin contacto con el líquido. Si una mezcla no saturada, como la que se encuentra en F (Figura 3), se enfría a presión constante sin contacto con un líquido, la trayectoria del proceso de enfriamiento sigue la línea FG, la mezcla se va acercando más a la saturación conforme disminuye la temperatura y se satura

completamente en la temperatura de rocío ( $T_r$ ). Todas las mezclas de humedad absoluta ( $Y$ ), sobre esta figura tienen el mismo punto de formación de rocío. Si la temperatura se reduce sólo una cantidad infinitesimal debajo de  $T_r$ , el vapor se condensará en la forma de un rocío líquido (Treybal, 1980).

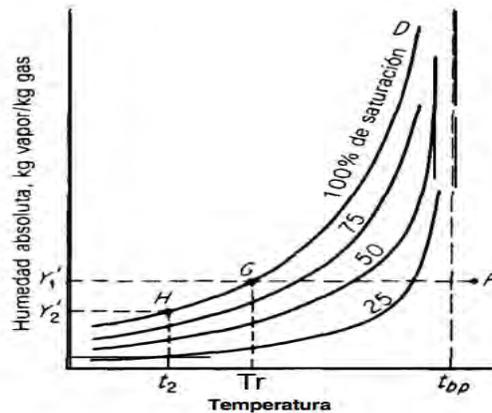


Figura 3. Representación en carta psicrométrica del punto de rocío (Treybal, 1980).

La sublimación es el proceso que consiste en el cambio de estado de sólido al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido. Al proceso inverso, es decir, al paso directo del estado gaseoso al estado sólido, se le denomina sublimación inversa o ablimentación, también llamada deposición. La transición del estado sólido al estado gaseoso requiere un estado líquido intermedio. Pero a temperaturas inferiores a la del punto triple, un aumento de la presión dará lugar a una transición de fase, directamente del gas al sólido.

### 1.3.1.2 Segundo proceso de formación

Cuando ambas, temperatura de rocío y temperatura de la superficie, están por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ , la sublimación inversa puede ocurrir; el vapor de agua cambia directamente a sólido. En ambos casos debe existir una diferencia de

temperaturas,  $\Delta T$  subenfriamiento ( $\Delta T$  sub), entre la superficie y el punto de rocío, el llamado grado de subenfriamiento, antes de que ocurra el cambio de fase.

Como se ilustra en la Figura 4, esta diferencia de temperatura induce a una diferencia en la humedad,  $\Delta \omega$  sobresaturación ( $\Delta \omega$  sob), entre la corriente de aire y la superficie, que es llamado grado de sobresaturación. La nucleación de cristales de hielo puede ser considerado como el resultado de tres procesos psicrométricos independientes. Primero, el vapor de agua presente en la corriente de aire (A) es enfriado hasta el punto de rocío (A'). Este proceso se desarrolla en la capa limite térmica. Como resultado de la energía libre superficial, la nucleación empieza cuando se supera la barrera de energía, que depende en un enfriamiento adicional al punto (B). Cuando se supera la barrera de energía, el cambio de fase ocurre (B-C). Por lo tanto, el total de energía requerido a retirar para que suceda el proceso es una combinación de calor sensible (A-B) y calor latente (B-C) (Hermes *et al.*, 2009).

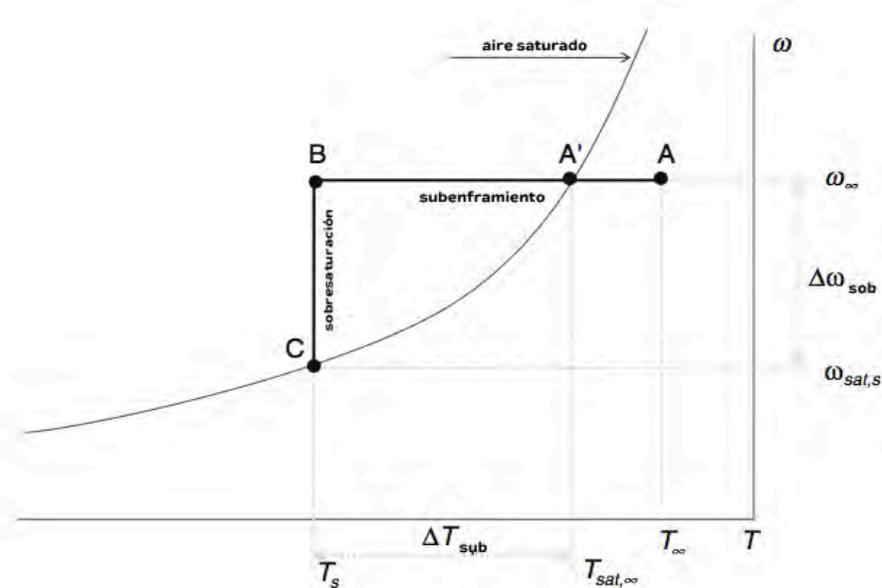


Figura 4. Proceso de la formación de escarcha en una carta psicrométrica (Piucco *et al.*, 2008).

El proceso de formación de escarcha puede dividirse en los siguientes pasos, ilustrados en la Figura 5. Primero, en cuanto las condiciones de no equilibrio son

satisfechas, una nucleación heterogénea sucede (1) y el núcleo empieza a crecer (2). Durante este proceso aumenta la extensión y la temperatura de la superficie del núcleo se hace más alta que la temperatura de la placa, requiriendo una mayor cantidad de energía para la eliminación del calor y para mantener el crecimiento del núcleo.

Cuando esta cantidad de energía se hace más grande que la remoción de energía necesaria para empezar la nucleación en un nuevo sitio, el núcleo deja de crecer y sucede una segunda nucleación (3). Por otra parte, cuando el nuevo núcleo crece (4) también aumenta la remoción de energía necesaria para mantener el crecimiento, esto genera nuevos sitios de nucleación que aparecen en la superficie del núcleo original (5, 6).

El sucesivo crecimiento y nucleación continúan hasta que los grados de sobresaturación y subenfriamiento se aproximan a 0°C, (7). A partir de este punto, la capa de escarcha se comporta como un medio poroso, en donde la difusión lleva a un incremento del espesor y la densidad (Hermes *et al.*, 2009).

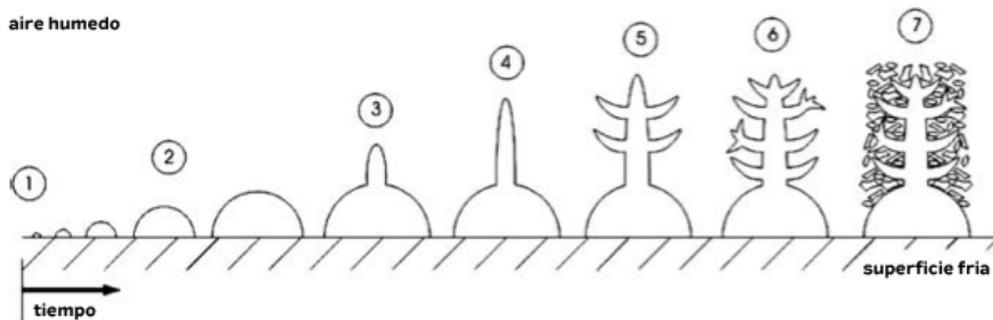


Figura 5. Crecimiento de las estructuras de escarcha (Hermes *et al.*, 2009).

El crecimiento de los cristales de hielo ha sido estudiado extensivamente con el antecedente del estudio del proceso de nevado. Generalmente, cristales de hielo en forma de prisma hexagonal tienden a crecer en longitud o radio bajo ciertas condiciones ambientales y finalmente en forma larga y delgada o formas cortas y

planas (Nelson, 2001) como se ve en la Figura 6. En el proceso de formación de escarcha, la capa inicial, continúa cambiando en su altura y su resistencia térmica.

De acuerdo con la Figura 6, a puntos críticos de temperatura, el cambio de las condiciones de la capa de escarcha puede causar que cambie el crecimiento de los cristales de hielo. Esto es que los cristales de hielo pueden cambiar su crecimiento en su longitud a su radio o viceversa en puntos críticos (Qu *et al.*, 2006).

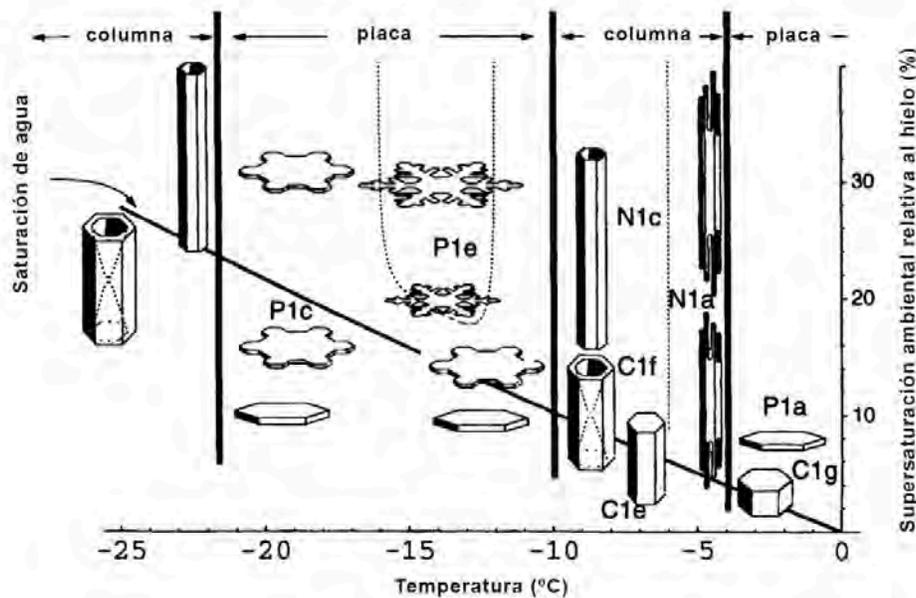


Figura 6. Formación de estructuras de hielo a distintas temperaturas (Nelson, 2011).

La formación de escarcha está influida por varios factores como puede ser la humedad relativa del medio, la velocidad del aire, la temperatura del aire, la temperatura de la superficie. En este sentido, Yonko y Sepsy (1967) reportaron que aunque en superficies planas se incrementó la velocidad de aire no hubo aumento considerable en el espesor de la escarcha, pero aumenta considerablemente la densidad. Lee *et al.* (1997) reportan que al incrementar la velocidad de aire en superficies planas, se incrementa ligeramente el espesor. Cheng y Wu (2003) indican que al incrementar la velocidad de aire resulta en un

ligero aumento del espesor. Kandula (2011) encontró que la velocidad de aire no tiene efecto apreciable en el espesor, pero si contribuye a la densificación. Tokura *et al.* (1983) reportan que la velocidad de aire no afecta al crecimiento de la escarcha. Lee *et al.* (1997) concluyeron que las propiedades del aire (temperatura, velocidad y humedad) y la temperatura de la superficie son los parámetros que más influencia tienen en el proceso de formación de escarcha. Cada autor tiene su propia opinión y sus resultados varían.

### 1.3.2 Escarcha en alimentos y el modelo de fenómeno de superficie

El proceso de descongelación de alimentos en ambientes con aire húmedo siempre viene acompañado por una serie de complicados fenómenos, como se observa en la Figura 7, que ocurren debido a las capas superficiales formadas por el vapor de agua que alcanza la superficie del alimento.

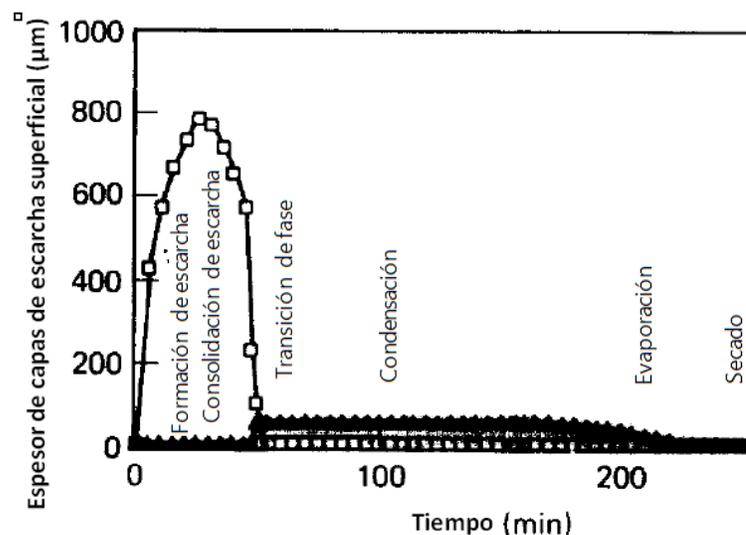


Figura 7. Variación del espesor en función del tiempo (Mannapperuma y Singh, 1987).

Mannapperuma y Singh (1987) propusieron un modelo de seis diferentes etapas donde se explica el fenómeno de formación de escarcha, dichos autores trabajaron sobre unas placas de gel de tilosa, debido a que sus propiedades térmicas son similares a las de la carne magra (Anderson y Singh, 2005), este modelo se explica a continuación:

1. Fase de formación de escarcha: cuando el alimento congelado se somete a un ambiente con humedad, una capa empieza a crecer en la superficie casi instantáneamente. Esta capa continúa creciendo mientras la temperatura de la interfase escarcha-aire está por debajo del punto de congelación del agua.
2. Fase de consolidación: cuando la temperatura de la interfase de escarcha-aire incrementa por arriba de la temperatura de congelación del agua, la formación de escarcha nueva cesa y el vapor de agua empieza a condensar, así como el agua líquida en la superficie de la capa existente. Esta agua migra hacia la capa de escarcha y se solidifica, por lo que se incrementa la densidad. Este proceso de la consolidación termina cuando la densidad de la escarcha alcanza la densidad del hielo.
3. Fase de transición: durante esta fase el vapor de agua alcanza la capa superficial y condensa como agua líquida, y forma una capa de agua en la capa de hielo y después el hielo existente gradualmente se funde. Esta etapa termina cuando la capa de hielo funde completamente.
4. Fase de condensación: la condensación del vapor de agua continúa durante esta etapa y termina cuando la temperatura de la interfase agua-aire alcanza la temperatura de rocío del ambiente.
5. Fase de evaporación: la capa de agua que ha sido acumulada en la superficie gradualmente se evapora.

6. Fase de secado: una vez que la capa de agua en la superficie ha evaporado completamente, además sucede una evaporación del alimento mismo. Esto reduce el contenido de humedad del alimento, deshidratándolo.

### **1.3.3 Propiedades termofísicas de la escarcha**

Estudios recientes se enfocan en las propiedades termofísicas y su relación con la estructura interna de la capa de escarcha que se forma. Se ha buscado relacionar la conductividad térmica y la densidad con las condiciones ambientales (temperatura ambiente y humedad relativa), geométricas (tipo de aleta y forma del tubo) para determinar de antemano el comportamiento de ablación y el efecto de este en la transferencia de calor y caídas de presión (Cui *et al.*, 2011).

Huang y Cho (2014) en su trabajo de modelado numérico, utilizan valores iniciales de conductividad térmica y densidad de escarcha, basándose en la manipulación y variación inicial de estas propiedades, encontrando convergencia de resultados para cierto intervalo de valores aplicados como valor inicial.

Existen varias ecuaciones que tratan de predecir el comportamiento de la escarcha, y cada autor presenta ecuaciones de distintas propiedades, como Gatica *et al.* (2009) que establecen un código computacional que simula la formación y crecimiento de escarcha sobre una placa mantenida a baja temperatura, por ablación del vapor de agua de una corriente de aire húmedo que fluye sobre ella. Hayashi *et al.* (1977) propusieron una correlación, para calcular su densidad en temperaturas por arriba de los  $-20^{\circ}\text{C}$ ; O'Neal y Tree (1984) formularon un modelo teórico que predice el crecimiento de la escarcha donde se le trató como un medio poroso que está en función de las propiedades de la corriente de aire y la temperatura de la placa; Sami y Doung, (1989) exponen un modelo para predecir el espesor de la escarcha y la densidad en una superficie plana en función del tiempo; Tao *et al.* (1993) plantearon un modelo del

crecimiento basado en la difusión de calor y masa dentro de la capa de escarcha.

A continuación, en la Tabla 1 se presentan algunas ecuaciones para determinar las propiedades termofísicas de la escarcha:

Tabla 1. Ecuaciones empíricas de las propiedades termofísicas de la escarcha

Propiedad Termo física	Unidades	Ecuación	Autor y año	No. ecuación
Conductividad térmica del hielo	(W/m K)	$k_i = \frac{630}{T}$ $k_i$ = Conductividad térmica del hielo $T$ = Temperatura superficial (K)	(Kim <i>et al.</i> , 2009)	1
Coeficiente de difusión de masa	(m <sup>2</sup> /s)	$D_{AB} = 1.451(10)^{-4} \frac{T^{1.72}}{P_{atm}}$ $D_{AB}$ = Coeficiente de difusión efectiva $T$ = Temperatura superficial (K) $P$ = Presión (Pa)	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)	2
Calor específico del hielo	(J/kg°C)	$C_{p_i} = 2109 + 3.66(T - 273.15)$ $C_{p_i}$ = Calor específico del hielo $T$ = Temperatura superficial (K)	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)	3
Densidad del hielo	(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_i = \frac{1}{1.0907(10)^{-3} + 1.4635(10)^{-7}T}$ $\rho_i$ = Densidad del hielo $T$ = temperatura superficial (°C)	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)	4
Conductividad térmica aire	(W/ m K)	$k_a = -3.381(10)^{-8} T^2 + 9.814(10)^{-5} T - 1.308(10)^{-4}$ $k_a$ = Conductividad térmica del aire $T$ = Temperatura aire (K)	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)	5
Densidad de la escarcha	(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = \varepsilon \cdot \rho_i + (1-\varepsilon)(\rho_a + \rho_v)$ $\rho$ = Densidad escarcha $\varepsilon$ = Fracción volumétrica $\rho_i$ = Densidad de hielo (kg/m <sup>3</sup> )	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)	6

		$\rho_a$ = Densidad aire seco (kg/m <sup>3</sup> ) $\rho_v$ = Densidad vapor de agua (kg/m <sup>3</sup> )		
Calor específico de la escarcha	(J/kg°C)	$C_p = \frac{(\epsilon\rho + C_{p_a}(T) + (1-\epsilon)(\rho_a C_{p_a} + \rho_v C_{p_v}))}{\rho}$ <p> <math>C_p</math> = Calor específico escarcha (J/kg°C)  <math>\epsilon</math> = Fracción volumétrica de hielo  <math>C_{p_a}</math> = Calor específico del aire seco (J/kg°C)  <math>T</math> = Temperatura (K)  <math>\rho_a</math> = Densidad del aire seco (kg/m<sup>3</sup>)  <math>\rho_v</math> = Densidad del vapor de agua (kg/m<sup>3</sup>)  <math>C_{p_v}</math> = Calor específico vapor de agua (J/kg°C) </p>	(Gatica et al., 2009)	7
Conductividad térmica de la escarcha	(W/m K)	$K_{eff} = \epsilon k_i + (1-\epsilon)k_a$ <p> <math>k_{eff}</math> = Conductividad térmica escarcha  <math>\epsilon</math> = Fracción volumétrica de hielo  <math>k_i</math> = Conductividad térmica hielo  <math>k_a</math> = Conductividad térmica aire seco </p>	(Gatica et al., 2009)	8
Porosidad	-	$\sigma = \frac{\rho_i - \rho}{\rho_i - \rho_p}$ <p> <math>\sigma</math> = Porosidad  <math>\rho_i</math> = Densidad hielo (kg/m<sup>3</sup>)  <math>\rho</math> = Densidad escarcha (kg/m<sup>3</sup>)  <math>\rho_p</math> = Densidad en el poro (kg/m<sup>3</sup>)  con, <math>\rho_p = \rho_a + \rho_v</math>  <math>\rho_a</math> = Densidad del aire seco (kg/m<sup>3</sup>)  <math>\rho_v</math> = Densidad del vapor de agua (kg/m<sup>3</sup>) </p>	(Gatica et al., 2009)	9
Porosidad de	-	$\epsilon_a = 1 - b_1 \exp[b_2(T_f - 273.15)]$	(Kim et al., 2009)	10

aire en la escarcha		$\epsilon_a$ = porosidad Tf= temperatura superficial (K)		
Densidad de cristales en sublimación	(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_c = (-10429.56) + 41.57 T$ $\rho_c$ = densidad cristales en sublimación (kg/m <sup>3</sup> ) T=Temperatura superficial (K)	(Sahin, 2000)	11
Densidad de la escarcha	(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f = 650^{0.227(T_f-273.15)}$ $\rho$ = densidad de escarcha T <sub>f</sub> =Temperatura superficial (K)	(Hayashi , 1977)	12

Las propiedades térmicas de la escarcha y del hielo formado generalmente se reportan en función al tiempo (Barzanoni *et al.*, 2011; Sahin, 2000; Wang *et al.*, 2013; Kandula, 2011).

Al considerar a la escarcha como agua en estado sólido al igual que el hielo, difiriendo de éste por su alta porosidad y fragilidad, es posible que la escarcha llegue a tener las propiedades del hielo, pero requiere de una constante de difusión de agua en los poros encontrados entre las redes de cristales. Esta característica particular de alta porosidad en el agua al cambiar a estado sólido se debe a que el agua es de las pocas sustancias en disminuir su densidad al cambiar de la fase líquido a sólido, es decir se expande.

Algunos valores que están relacionados con las propiedades de la escarcha son: la conductividad térmica del hielo reportada a -20 °C con un valor de 2.4 W/m K y se sabe que es 4 veces mayor a la del agua; Perry *et al.* (1999) reportan valores a -5 °C para la densidad, la conductividad térmica y el Cp de 917.5 kg/m<sup>3</sup>, 2.25 W/mK y 2.02 J/g °C respectivamente y a -15 °C, valores de 919.4 kg/m<sup>3</sup>, 2.34 W/mK y 1.97 J/g °C (Biguria y Wenzel, 1970).

En cuanto a las principales propiedades del aire, que varían según la temperatura y la presión atmosférica, se reporta que a 1 atm (Çengel y Cimbala, 2006), la densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ) a  $-20^\circ\text{C}$  es de 1.394, a  $0^\circ\text{C}$  es 1.292 y a  $20^\circ\text{C}$  tiene un valor de 1.204; la conductividad térmica ( $\text{W/m K}$ ) presenta los siguientes valores:  $-20^\circ\text{C}$  (0.02211),  $0^\circ\text{C}$  (0.02364) y  $20^\circ\text{C}$  (0.02514; la difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) a  $-20^\circ\text{C}$  ( $1.578 \times 10^{-5}$ ),  $0^\circ\text{C}$  ( $1.818 \times 10^{-5}$ ) y  $20^\circ\text{C}$  ( $2.074 \times 10^{-5}$ ) y la variable que presenta valores más estables es el calor específico ( $\text{J/kg K}$ )  $-20^\circ\text{C}$  (1005),  $0^\circ\text{C}$  (1006) y  $20^\circ\text{C}$  (1007).

El coeficiente de difusión o de transferencia de masa, es determinado generalmente, en función de números adimensionales como los números de Reynolds ( $Re$ , que representa a las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas), el número de Schmidt ( $Sc$ , representado por las fuerzas viscosas y su relación con la difusión másica), el número de Prandtl ( $Pr$ , transporte viscoso y transporte calor) y el número de Lewis ( $Le$ , transporte de calor y su relación con el transporte de masa); el número de Sherwood ( $Sh$ , que relaciona la velocidad de transferencia de masa por flujo convectivo y la velocidad de transferencia de masa por difusión, y es considerado como un gradiente de concentración adimensional en la superficie sin embargo, puede ser usado para relacionar los coeficientes de transferencia de masa con otros números adimensionales tales como el número de  $Re$  y  $Sc$ ). La velocidad de transferencia de masa es controlada por la capa límite y es dependiente de su espesor y a su vez éste depende de las propiedades del fluido como velocidad, distribución y dimensiones del sistema y aumenta con el incremento del gradiente de concentración en la superficie y depende de: el flujo del fluido y de sus propiedades, de la geometría del sistema y de la localización dentro del sistema (Treybal, 1980).

La densidad de los cristales en sublimación puede ser entendida como una densidad aparente, que está en función de la temperatura del cristal de hielo, determinada a partir de la temperatura de formación del cristal y que se asume es la temperatura superficial, como lo reporta Sahin (2000). La densidad de un copo

de nieve o de una hojuela de escarcha es igual a la del hielo, no dejan de estar formados por agua en estado sólido, pero difiere en la forma de unirse con otras moléculas de agua.

La porosidad y la tortuosidad en la capa de escarcha está relacionada con los huecos de aire, que tienen una conductividad térmica baja, lo que representa una resistencia térmica (Lenic *et al.*, 2009). La expansión del agua a bajas temperaturas causa espacios rellenos de aire entre las uniones de las partículas de agua sólida. Otra característica que mencionar, es la polaridad de la molécula, ya que la orientación de los dos átomos de hidrógeno alrededor del de oxígeno al formar los puentes de hidrogeno con otra molécula de agua no son iguales en cada unión. Así como existe un punto de unión entre los cristales también lo hay entre los espacios de aire, formando un camino por el cual puede fluir el aire húmedo, a este trayecto se le conoce como tortuosidad, y depende de las características del camino. La presencia de estos trayectos tiene importancia en la difusión del vapor de agua entre los espacios disponibles en el cúmulo de fragmentos de agua sólida. Este parámetro se utiliza para determinar una difusión efectiva del vapor de agua en vez de únicamente la difusión. La naturaleza del fenómeno hace inherente la presencia de porosidad y tortuosidad por la forma de unirse los cristales. En general, más del 90% de la masa de agua transferida es parte del incremento en el espesor, indicando que la cantidad de agua difundida es pequeña en comparación con la masa total depositada (Na y Webb, 2004).

La porosidad es importante porque con un mayor espesor de escarcha porosa, se presenta una mayor resistencia térmica, disminuyendo las velocidades de transferencia de masa y de calor (Mannapperuma y Singh, 1987).

Las variables como densidad, conductividad térmica y porosidad son importantes debido a que tratan de explicar el comportamiento de la escarcha, en el caso de la densidad trata de explicar la relación entre masa y volumen, pero esta no es igual a la del hielo debido a la porosidad; esta corresponde al aire contenido dentro de la misma y es por esto que la densidad es diferente; la conductividad térmica

también es importante debido a que depende de la porosidad, esto debido a que si hay aire dentro, puede generar una resistencia debido a que el aire tiene una conductividad térmica baja.

## **1.4 Tipos de Agua**

La humedad del ambiente se acumula en superficies lo que genera la formación de escarcha, esta se funde y se obtiene agua.

Existen diferentes tipos de aguas con diferentes métodos de purificación que buscan eliminar los contaminantes, sales y minerales presentes en el agua.

El agua destilada es agua que ha sido hervida y luego recondensada para devolver el agua al estado líquido. La destilación se usa para purificar el agua. Los contaminantes disueltos tales como sales se quedan en el tanque donde el agua hierve mientras el vapor de agua se eleva hacia fuera.

Desionización: Proceso que utiliza resinas de intercambio iónico de fabricación especial que eliminan las sales ionizadas del agua (Osmonics, 1997).

Agua Tridestilada es el nombre común dado al agua Tipo 1 según las normas de "Métodos normalizados de Análisis" esta agua no contiene ningún contaminante, ya que es sometida a diferentes procesos para eliminar cualquier compuesto ajeno como lo son sales minerales, bacterias y esporas.

Teóricamente estos tipos de agua son diferentes debido a los procesos que tienen para eliminar sustancias como sales, minerales, contaminantes o iones.

## 1.5 Análisis Térmico

Otra forma importante para determinar algunas propiedades de la escarcha es la calorimetría diferencial de barrido, esta técnica permite evaluar los cambios térmicos de una muestra, así como flujo de calor, entalpía y  $C_p$ . Estas variables sirven para explicar los cambios energéticos que tiene una sustancia en una velocidad de calentamiento constante.

La calorimetría diferencial de barrido modulada (MDSC) es una técnica de análisis térmico que ha sido usada por varias décadas. Es aplicable a una variedad de materiales incluidos polímeros, farmacéuticos, alimentos e inorgánicos. Las mediciones del MDSC proveen información cualitativa y cuantitativa en función al tiempo y la temperatura respecto a las transiciones de los materiales que incluye procesos endotérmicos y exotérmicos o cambios en la capacidad calorífica.

$$\frac{dQ}{dt} = Cp_b + f(T, t)$$

donde:

$\frac{dQ}{dt}$  es el flujo de calor resultante

$C_p$  es la capacidad calorífica de la muestra (J/ °C)

$b$  es la velocidad de calentamiento ( $dT/dt$ )

$f(T, t)$  es el flujo de calor del proceso cinético

De la ecuación general resulta que el flujo de calor se compone de dos elementos: uno es función de la capacidad calorífica de la muestra y la tasa de cambio en la temperatura y el otro es función de la temperatura absoluta y el tiempo. En el DSC convencional solo la suma de dos componentes es determinada y se le conoce como flujo de calor total (Verdonck *et al.*, 1999). En MDSC, la tasa de calentamiento modulado permite la medición del flujo de calor que responde a la

tasa de calentamiento (señal reversible) y del flujo de calor que responde a la temperatura/tiempo absoluta (señal no reversible) (Thomas, 2005c).

El flujo de calor total y dos componentes individuales se pueden distinguir, como el componente de la capacidad calorífica ( $C_{p_b}$ ) o el flujo de calor reversible y el componente cinético ( $f(T,t)$ ) o el flujo de calor no reversible (Verdonck *et al.*, 1999). Los cambios en la capacidad calorífica y la fusión cristalina se encuentran dentro de la señal reversible, mientras los procesos cinéticos como la cristalización, evaporación, relajación muscular y reacciones químicas contribuyen a la señal no reversible.

El MDSC no mide la reversibilidad o no reversibilidad de las transiciones, ni está basado en el calentamiento o enfriamiento de la muestra (Thomas, 2005c).

El principio de operación de MDSC se muestra en la Figura 8, usa dos tasas de calentamiento, una tasa de calentamiento lineal que proporciona información similar al DSC estándar, y una tasa de calentamiento modulada o sinusoidal que permite la medición simultánea de la capacidad calorífica de la muestra (Thomas, 2005a).

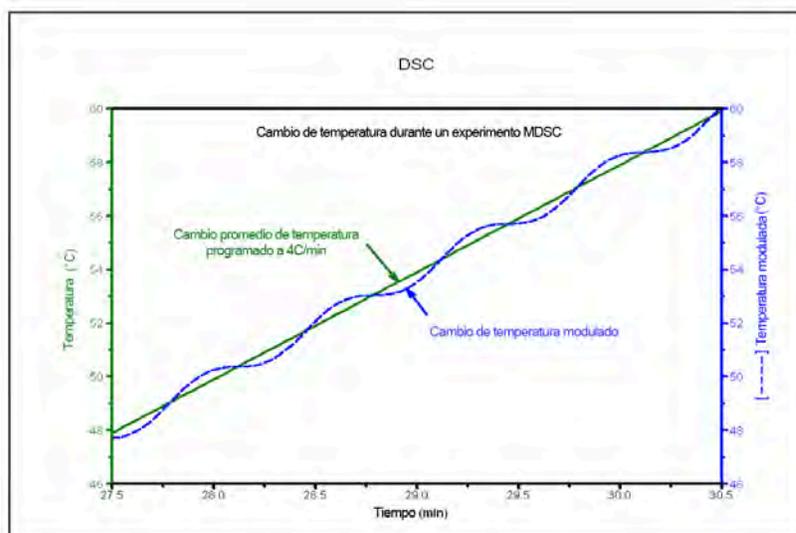


Figura 8. Perfil de temperaturas de un experimento MDSC (Thomas, 2005a).

Todas estas señales se calculan a partir de 3 señales medidas: tiempo, temperatura modulada y flujo de calor modulado.

El flujo de calor en el MDSC es calculado a partir del promedio del flujo de calor; este promedio corresponde al flujo de calor total en un experimento de DSC convencional. En DSC convencional, el  $C_p$  puede ser calculado por la diferencia en el flujo de calor de dos experimentos con muestras idénticas a dos diferentes tasas de calentamiento. En MDSC, el  $C_p$  puede ser determinado en un solo experimento debido a una variación periódica en la tasa de calentamiento. El flujo de calor reversible es calculado multiplicando el  $C_p$  con la tasa de calentamiento  $b$ . El componente cinético o el flujo de calor de no reversible es la diferencia entre el flujo de calor total y el flujo de calor reversible. Los flujos de calor total, reversible y no reversible de un experimento MDSC se muestran en la Figura 9.

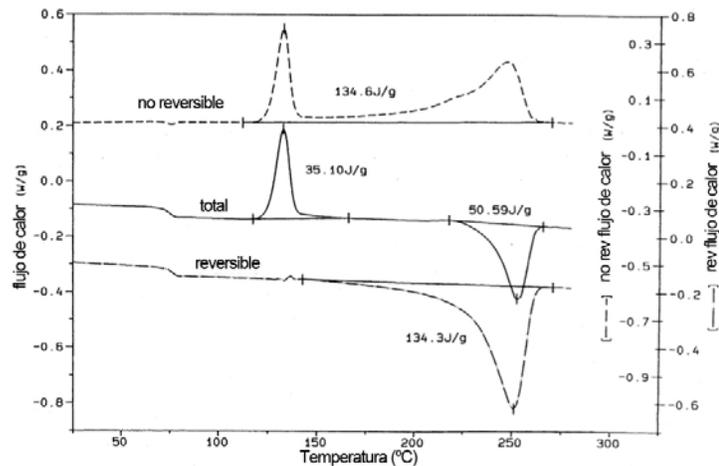


Figura 9. Flujo de calor total, reversible y no reversible (Verdonck *et al.*, 1999).

La interpretación de una curva DSC muchas veces es difícil, en el caso de MDSC se puede dividir en flujo de calor reversible y no reversible. Como el componente reversible está relacionado a la capacidad calorífica de la muestra, se puede detectar un evento de transición vítrea. Por otro lado en un flujo de calor no reversible se pueden detectar procesos como una relajación entálpica, cristalización, evaporación y descomposición (Verdonck *et al.*, 1999). Por ejemplo,

el cambio en la capacidad calorífica debido a una transición vítrea generalmente es considerado como un proceso reversible y se observa en la señal reversible.

Cuando el agua o un solvente evaporan, hay un salto en la señal reversible y este es claramente un proceso no reversible. La señal reversible es el componente de la capacidad calorífica del total del flujo de calor y todos los procesos experimentan un cambio en la capacidad calorífica. Todos los cambios en el  $C_p$  aparecen en la señal reversible y la MDSC no intenta determinar si el proceso es reversible o no reversible (Thomas, 2005b).

## **1.6 Carne de cerdo**

La carne por ser un alimento altamente perecedero necesita conservación, generalmente se usa congelación para aumentar su vida útil, durante este proceso hay formación de escarcha, este fenómeno no es deseable ya que puede dañar las propiedades de textura, color y sabor, así como afectar a las proteínas y carbohidratos y propiciar pérdida de nutrientes del alimento.

La carne es la parte muscular comestible de los animales de abasto, sacrificados. Se incluyen en este concepto las porciones de grasa, hueso, cartílago, piel y tendones, que no se separan de este en los procesos de manipulación, preparación y transformación de la carne (Pascual y Calderón, 2000).

El músculo estriado se compone de fibras microscópicas largas y tubulares como se observa en la Figura 10, estas fibras se agrupan con ayuda del tejido conectivo (perimisio) formando el haz muscular en cuya intersección se alojan tejidos grasos, nervios y tendones. Las fibras pueden ser rojas y blancas, el color rojo se debe principalmente a una proteína llamada mioglobina.

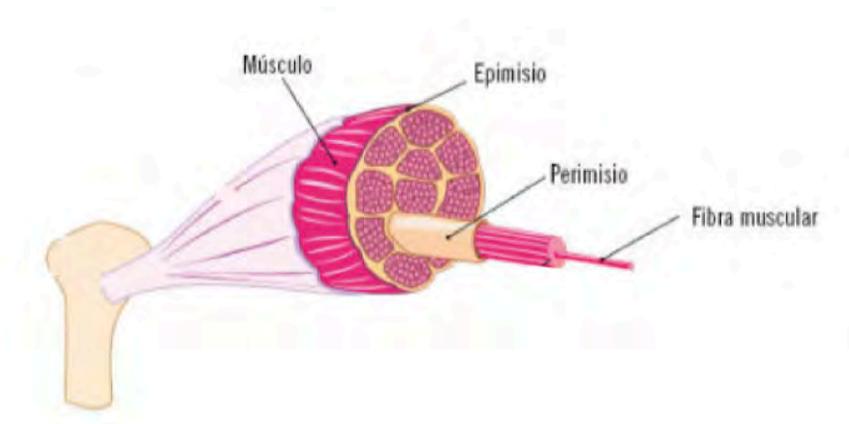


Figura 10. Estructuras que componen a un músculo (Dorado, 2011).

La cantidad y constitución de las fibras musculares determinan la buena calidad de la carne. Las proteínas del músculo, como las del tejido conectivo son la mioglobina, la actina-miosina y el colágeno son las más importantes en relación a la estructura y calidad de la carne (Bedolla *et al.*, 2004).

Las características sensoriales son con las que el consumidor puede valorar si la carne presenta o no un buen aspecto, estas pueden ser el color, textura, olor y la consistencia (Dorado, 2011).

La quemadura por frío genera cambios debido a que deshidrata y degrada el color (Figura 11), la textura y el sabor, esto puede ocurrir en la superficie de alimentos congelados (Kobs, 1997). Estos cambios indeseables son ejemplificados por el endurecimiento y la decoloración de la superficie de la carne, así como cambios en la coloración, de rojo a café. La mejor manera de evitar que la comida se dañe por quemadura por frío es sellar los alimentos congelados (Schimdt y Lee, 2009).

La carne es un alimento que al estar en conservación a bajas temperaturas sufre de formación de escarcha en su superficie, esto puede generar problemas en el producto, además de que la capa de hielo puede generar una barrera en la transferencia de calor y de masa al funcionar como una resistencia.



Figura 11. Quemadura por frio y deshidratación en carne (Schmidt y Lee, 2009).

# Capítulo 2

Metodología  
Experimental

Objetivo General: Determinación de fracción volumétrica y densidad de la escarcha para la evaluación de la conductividad térmica, el calor específico y la porosidad a partir del análisis de imagen y térmico y su contrastación con ecuaciones empíricas en la congelación de carne de cerdo.

Objetivo Particular 1: Determinación del efecto de la fracción volumétrica medida por análisis de imagen en algunas propiedades de escarcha calculadas por ecuaciones empíricas sobre placa metálica y cortes de carne de cerdo para dar confiabilidad a la metodología propuesta de medición

Objetivo Particular 2: Determinación del comportamiento térmico de la escarcha formada sobre placa metálica para inferir sobre las características del agua ablizada a partir de la calorimetría diferencial de barrido modulada

En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo experimental de las actividades realizadas.

## 2.1 Metodología experimental

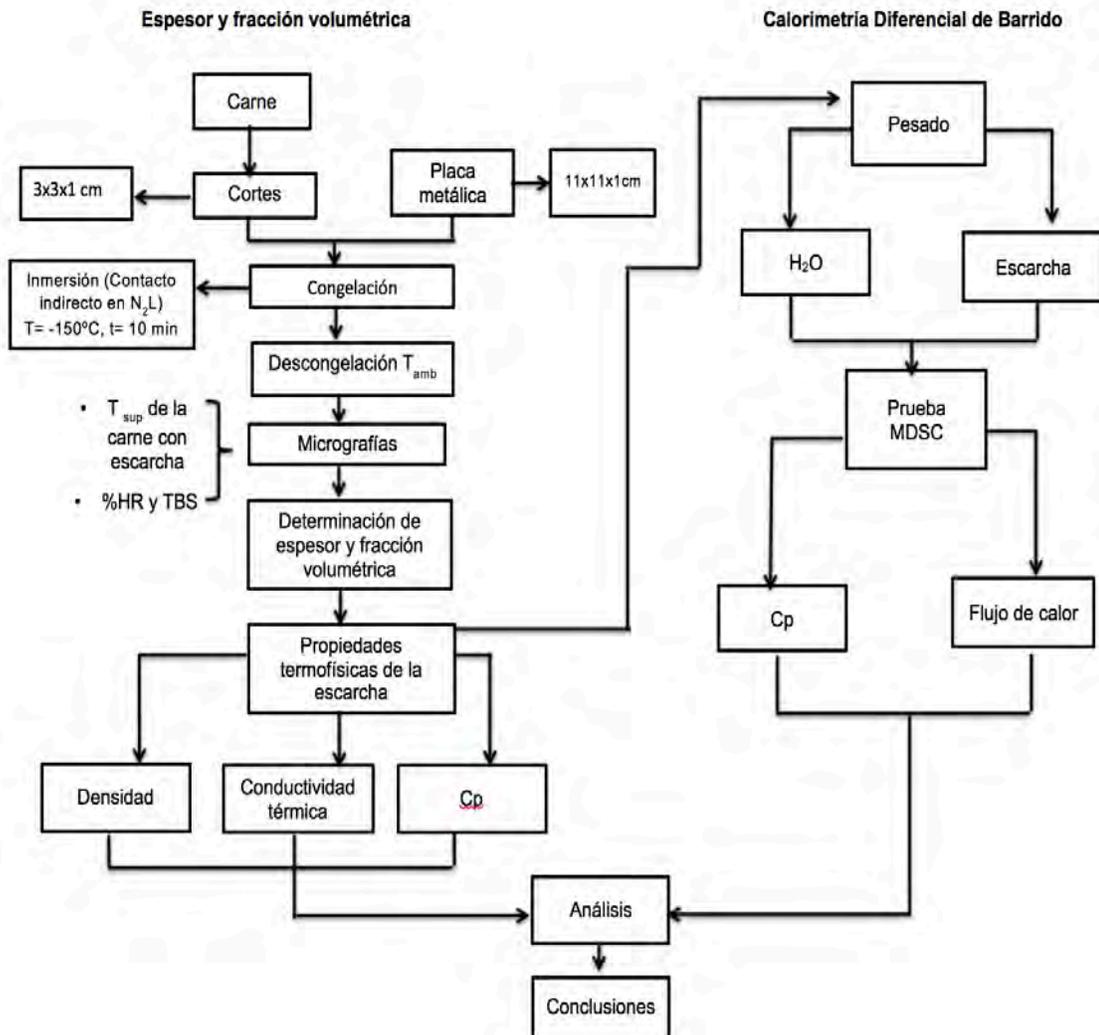


Figura 12. Diagrama experimental

## **2.2 Características de materia prima**

Se trabajó con cortes de lomo de cerdo, que cumplieran con ciertas características como ser macho castrado raza Duroc-Jersey de 6 meses de edad, el pH estaba entre 5.4 a 5.9 (Braña *et al.*, 2011) y se considera normal para la carne de cerdo. Los cortes siempre se realizaban de un solo movimiento y eran del músculo *Longissimus thoracis*. Los cortes del lomo midieron 1 cm de espesor

La medición del pH se realizó con potenciómetro HI 99163 y un electrodo de penetración Hanna, se perforaba el lomo de cerdo y se introducía el electrodo de manera perpendicular a la carne y a unos 2 cm de profundidad.

## **2.3 Congelación criogénica**

La congelación de la placa metálica (11x11x1cm), se realizó por medio de inmersión en nitrógeno líquido durante 10 minutos, después de ese tiempo se sacó la placa y se dejó pasar un minuto y medio para que hubiera formación de escarcha y así poder proceder a la toma de las fotografías. La congelación de los cortes de carne (Figura 13a) se realizó por contacto indirecto con nitrógeno líquido, como puede observarse en la Figura 13b. Al igual que con la placa, el tiempo de congelación fue de 10 minutos y se esperó el mismo tiempo para que se formara la escarcha.



Figura 13. a) acomodo de los cortes de carne en la placa.

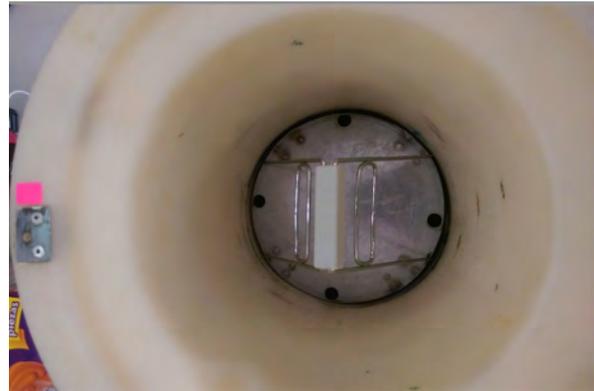


Figura 13. b) Placa dentro del recipiente de nitrógeno.

Después se midieron el espesor de la escarcha y la temperatura superficial como se menciona a continuación.

## 2.4 Espesor de escarcha

Para la toma de imagen se empleó un microscopio estereoscópico EZ4D (LEICA). En un portaobjetos se colocó la muestra sobre la platina y una vez enfocada la imagen se empleó el programa Leica Application Suite V3 para analizar la micrografía. Cada minuto se tomó una micrografía (Figura 14), la secuencia terminó cuando la temperatura superficial de la placa y del corte de carne fue  $\approx 0^{\circ}\text{C}$ . La medición de esta temperatura se realizó con un termómetro de infrarrojo Cole Parmer 39650-3, debido a que la placa y el corte está a condiciones ambientales y es una variable importante, se midió la humedad relativa y la temperatura ambiental por medio de un psicrómetro HD500 EXTECH cada minuto durante la fusión de la escarcha.

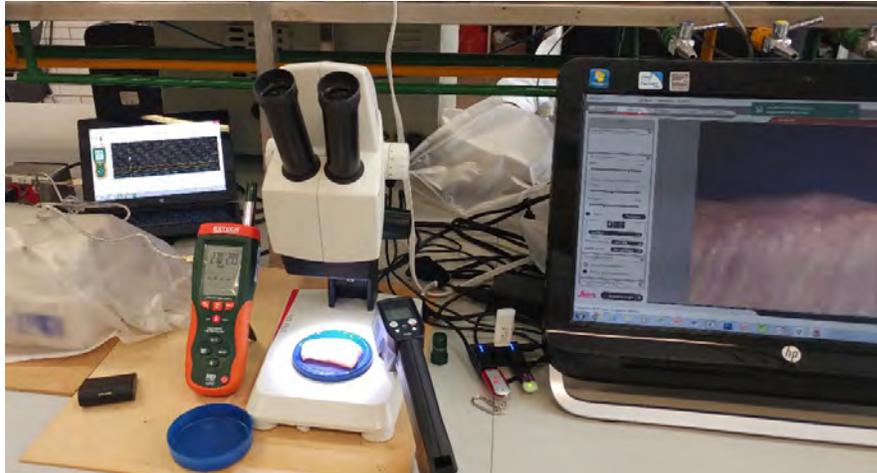


Figura 14. Toma de imágenes en el esteromicroscopio LEICA

La medición del espesor de la escarcha se hizo con el programa Adobe Photoshop CS5, donde se traslapan las imágenes, una imagen donde hay escarcha visible y la otra imagen donde la escarcha se ha fundido por completo (Figura 15), de este modo es más fácil poder determinar el espesor (Meléndez, 2011).



Figura 15. Traslape de imágenes en Photoshop

Para la determinación del espesor se realizó una relación que consistía en una conversión de unidades; de píxeles (px) a milímetros (mm), la relación se obtuvo por medio del programa del esteromicroscopio Leica, donde se midió la distancia que había de 5 a 6 en la regla de la Figura 16, la medida fue de 10.232mm.

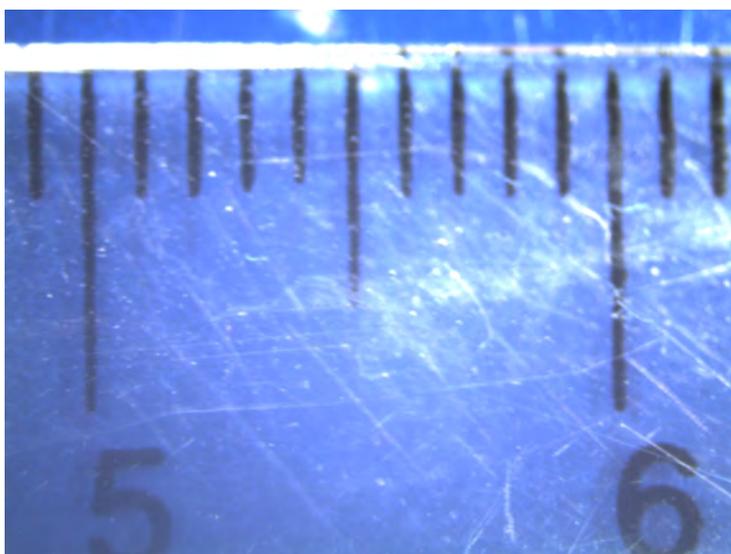


Figura 16. Imagen para la determinación de la relación matemática.

Se utilizó la misma imagen (Figura 16) en Photoshop y la distancia en pixeles de 5 a 6 era de 1506px. Así se obtuvo la relación donde  $10.232\text{mm} = 1506\text{px}$  para poder hacer las mediciones del espesor.

## 2.5 Fracción volumétrica

Para la determinación de la fracción volumétrica de hielo se utilizó el programa Photoshop, usando el efecto dividir del menú de capas se alcanza a ver de diferente color lo que es escarcha y lo que es aire (Figura 17), se trazó un área de 24px x 24px, dentro de este espacio, hay una parte que es hielo y una parte que es aire (porosidad).

Los espacios blancos fueron considerados como la porosidad de la escarcha. Como puede verse en la Figura 18, dentro del área se encuentran los espacios blancos marcados con un recuadro rojo, estos recuadros representan una fracción del área total marcada de negro. La fracción volumétrica total del área del recuadro negro se obtenía descontando la fracción que representaba cada cuadro rojo.

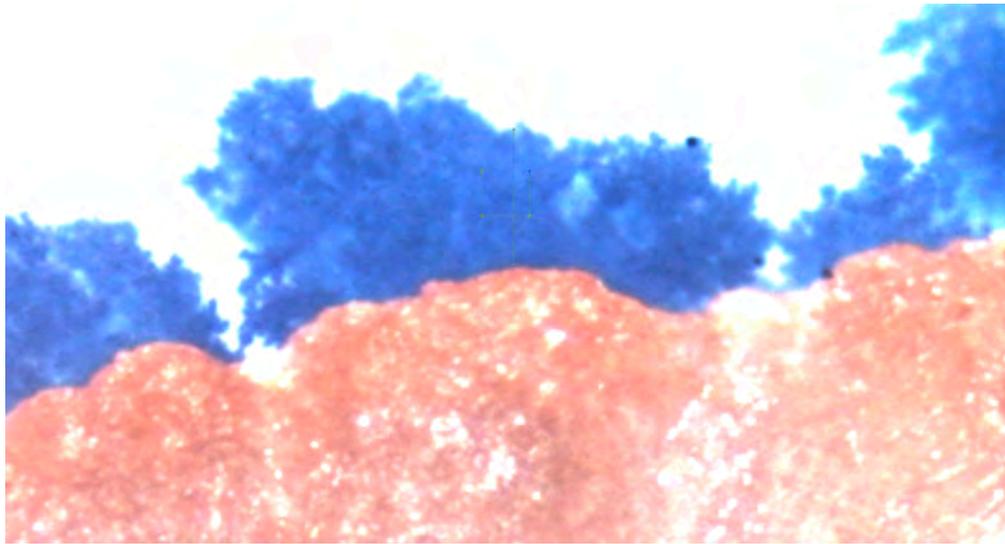


Figura 17. Traslape de dos imágenes de carne para determinar el espesor.

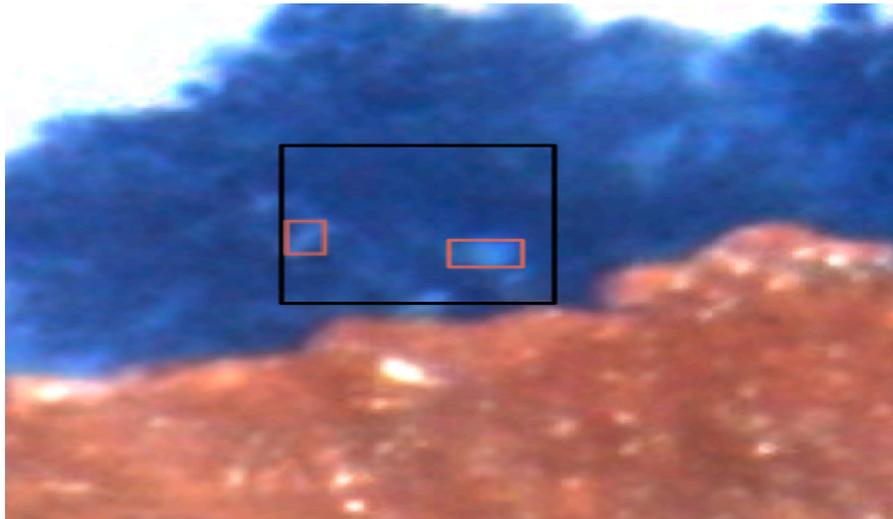


Figura 18. Traslape de dos imágenes de carne para determinar la fracción volumétrica.

Para cada minuto se obtuvieron 3 espesores y fracciones volumétricas de hielo de 3 zonas diferentes.

Se realizó un promedio de los espesores y las fracciones volumétricas con sus respectivas desviaciones y coeficientes de variación

## **2.6 Cálculo de las propiedades de la escarcha**

Para la determinación de las propiedades de la escarcha se realizaron hojas de cálculo de Microsoft Excel, con las ecuaciones de la Tabla 1, con base en la temperatura superficial de la escarcha, la temperatura de bulbo seco y la fracción volumétrica se realizaron los cálculos para la obtención de la densidad de la escarcha propuesta por 3 distintos autores, la ecuación 6 de Gatica (2005), la 11 de Sahin (2000) y la 12 de Hayashi (1977). También se utilizó la ecuación 8 de conductividad térmica de la escarcha de Gatica (2005).

Se realizaron 3 repeticiones y se obtuvieron promedios de los valores con desviaciones y coeficientes de variación.

## **2.7 Calorimetría Diferencial de Barrido Modulada (MDSC)**

Se sumergió una placa de metal en nitrógeno líquido, se sacó del nitrógeno y se esperó el mismo tiempo que en el análisis de espesor, para que se formara escarcha en la placa, después de que se formó, se obtuvo la muestra.

Para un trabajo cuantitativo, se pesó la charola y la tapa, estas son de aluminio, con cuidado se depositó la muestra en la charola, se pesó otra vez, después se colocó la tapa hermética sobre la charola y se selló manteniendo una temperatura aproximada durante el proceso de preparación.

Posteriormente se colocó la charola con la muestra en la celda de medición, en su respectivo lugar (Figura 19), junto con la muestra de referencia. Se colocaron las distintas tapas y se corrió el programa.

También se realizaron pruebas de calorimetría con agua destilada, agua tridestilada, agua desionizada y agua comercial (bonafont).

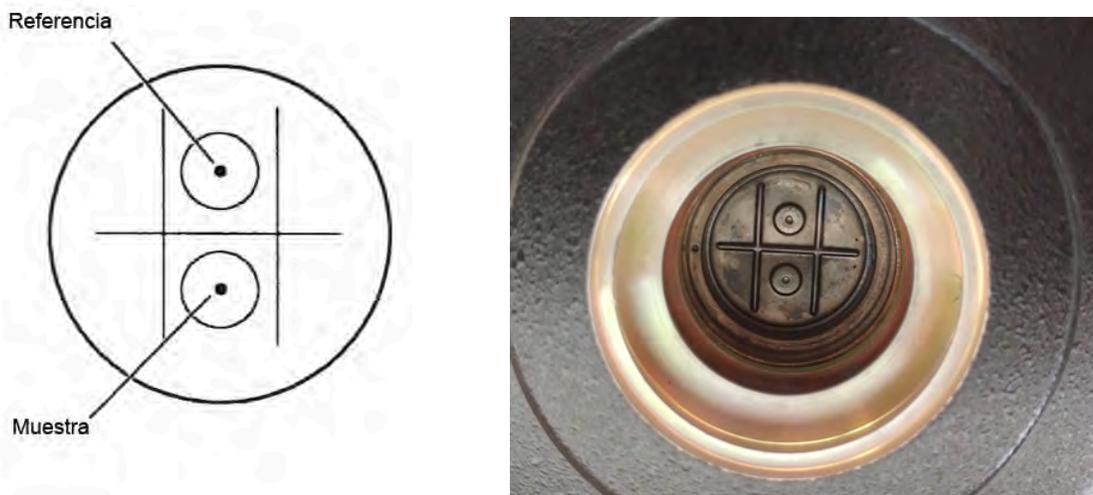


Figura 19. Acomodo de las charolas en el calorímetro

La prueba se realizó en un Calorímetro Diferencial de Barrido Modulado 2920 (TA, Instruments), a una velocidad de flujo de nitrógeno de 60 mL/min y a una velocidad de barrido de 10 °C/min desde -40 a 60 °C, como una modulación de temperatura de  $\pm 1.592$  °C cada 60 segundos.

Se obtuvieron los termogramas de flujo de calor total, flujo de calor reversible e irreversible. Posteriormente usando el software TA Universal Analysis se obtuvo el valor del  $C_p$ .

# Capítulo 3

## Análisis y Discusión de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados derivados de la experimentación realizada que dan respuesta a los objetivos planteados.

Se presenta inicialmente los resultados correspondientes a la placa metálica, retomando las ecuaciones presentadas en la Tabla 1, que están aplicadas en este tipo de superficies, con la finalidad de evaluar el efecto de la fracción volumétrica determinada experimentalmente sobre las variables termofísicas: conductividad térmica y densidad de la escarcha. En segundo lugar, se realizó el análisis de la formación superficial de escarcha en la superficie de la carne de cerdo, en cuanto a la fracción volumétrica determinada y su efecto sobre las mismas variables termofísicas.

Por último, se hizo la comparación de los cambios cinéticos y estructurales de diferentes tipos de agua y de escarcha proveniente de placa metálica evaluados por calorimetría diferencial de barrido modulado (MDSC) en el  $C_p$ , entalpía, flujo de calor total y no reversible.

Para el cálculo de las propiedades de la escarcha antes fue necesario determinar las propiedades del hielo, ya que dependen unas de otras.

### **3.1 Fracción volumétrica de hielo en metal**

Se determinó la fracción volumétrica de hielo ( $\epsilon$ ), la cual es mencionada por Gatica (2005), Luer y Beer (2000) en su estudios pero su valor lo suponen, es por lo que se determinó en este trabajo para ver su efecto sobre las propiedades más significativas de una superficie metálica.

En la Figura 20 se observa la variación de la fracción volumétrica de hielo en función al tiempo. El espesor y la fracción volumétrica fueron los parámetros que

se determinaron a partir de imágenes digitales y las demás variables a partir de ecuaciones.

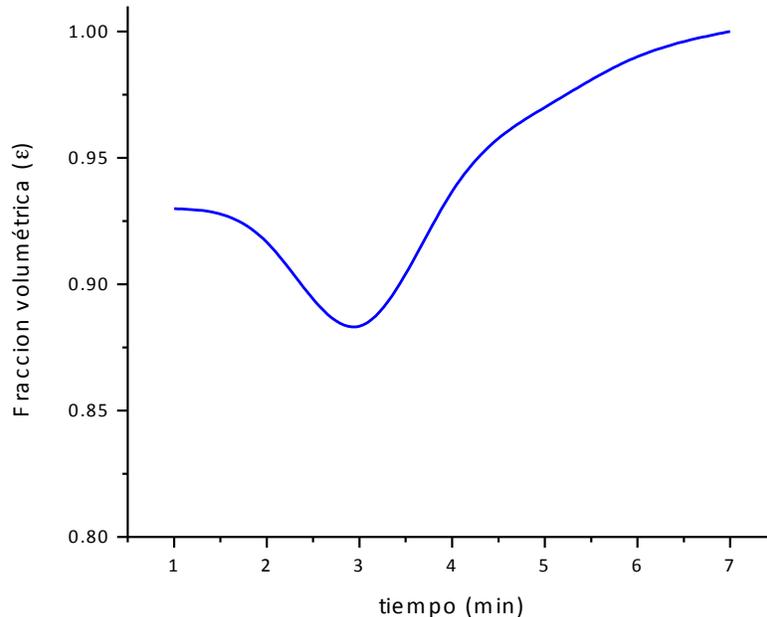


Figura 20. Variación de la fracción volumétrica en metal

Se puede observar que al minuto 7 se tiene una fracción volumétrica de hielo de 1, en el tiempo siguiente (minuto 8) el espesor y la fracción volumétrica ya no eran medibles debido a que la escarcha se fundió por completo.

Cuando se empieza a formar la escarcha en la superficie, la fracción volumétrica de hielo es menor a 1, esto debido a que empieza a crecer la escarcha, por lo que hay más espacios vacíos dentro de ella (porosidad), después viene un periodo donde la fracción aumenta debido a que el vapor de agua se condensa y migra hacia la capa de escarcha donde se solidifica (Mannapperuma y Singh, 1987).

En la Figura 21 se muestra la variación del espesor en función al tiempo, donde se observa que la formación de la escarcha empieza en 0.43mm, después viene un

periodo de crecimiento hasta llegar a un espesor máximo de 1.29 mm y posteriormente empieza a fundirse por lo que el espesor empieza a disminuir hasta que funde por completo la escarcha.

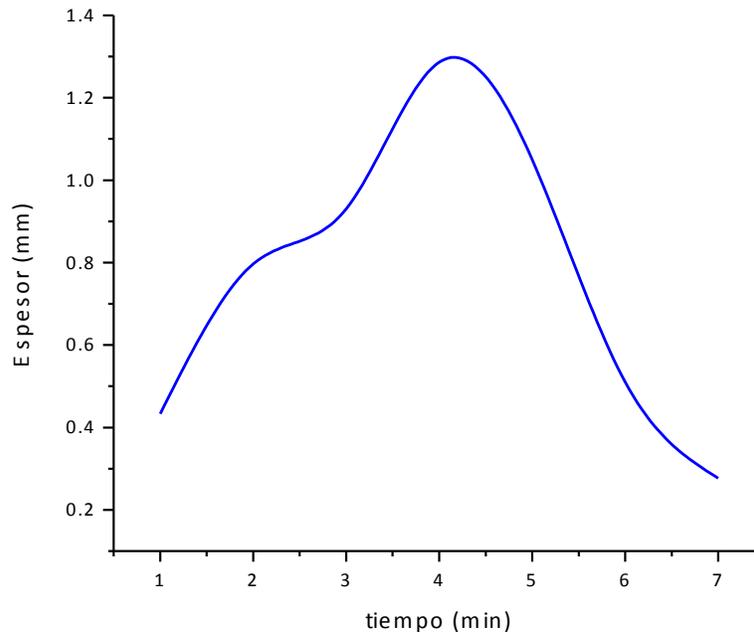


Figura 21. Variación del espesor de la escarcha en metal

En los primeros minutos (1 a 4) es el período en el que el espesor aumenta, en este tiempo la escarcha tiene mayor contenido de aire, y esto se refleja en el valor de fracción volumétrica. A partir del minuto 4 empieza a disminuir el espesor y hay menos aire en la escarcha, por el fenómeno de consolidación que se presenta en la escarcha, donde el vapor de agua del aire se condensa y se solidifica.

### 3.2 Conductividad térmica de la escarcha en metal

La formación de escarcha en el área de la refrigeración y aire acondicionado tiene efectos adversos en la transferencia de calor. La deposición en la superficie de los intercambiadores de calor puede ser perjudicial para su operación eficiente debido a que la escarcha actúa como un aislante térmico, que reduce la capacidad de la

superficie de transferir calor. En la Figura 22 se muestra la conductividad térmica en la placa metálica. Para el cálculo de la conductividad térmica se utilizó la ecuación propuesta por Gatica (ecuación 8) de la Tabla 1.

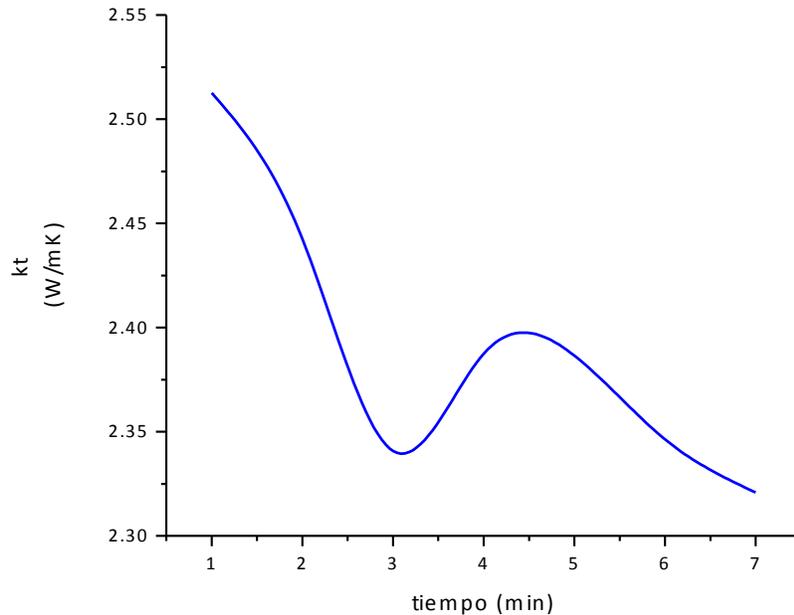


Figura 22. Variación de la conductividad térmica en metal

La variación de la conductividad térmica depende de la fracción volumétrica, si hay una fracción menor quiere decir que hay más aire y por lo tanto la conductividad térmica de la escarcha es menor. El aire al tener una conductividad térmica (0.024 W/m K), más baja que el hielo genera el problema de transferencia de calor. Cuando la fracción volumétrica es 1, se considera que toda la superficie de escarcha es hielo y no hay aire. Al usar la ecuación de conductividad térmica propuesta por Gatica, a una temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$  se obtienen valores de 2.31 W/m K. En la literatura se reportan algunos valores de conductividad térmica del hielo de 2.03 W/m K (Incropera y De Witt, 1999) a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Por lo que los valores de conductividad de la escarcha son similares a los del hielo si se considera que no hay aire ocluido y la variación de la conductividad depende del contenido de aire.

### 3.3 Densidad de la escarcha en metal

En el caso de la densidad se manejaron tres ecuaciones que fueron propuestas por distintos autores como fueron las de Gatica (ecuación 6), Sahin (ecuación 11) y Hayashi (ecuación 12) de la Tabla 1.

Las ecuaciones de densidad propuestas por Hayashi y Sahin solo toman en cuenta la temperatura superficial; en el caso de Gatica toma en cuenta la fracción volumétrica de hielo, y las conductividades térmicas del aire seco y el hielo.

En la Figura 23 se muestran los comportamientos que toman las distintas ecuaciones de densidad.

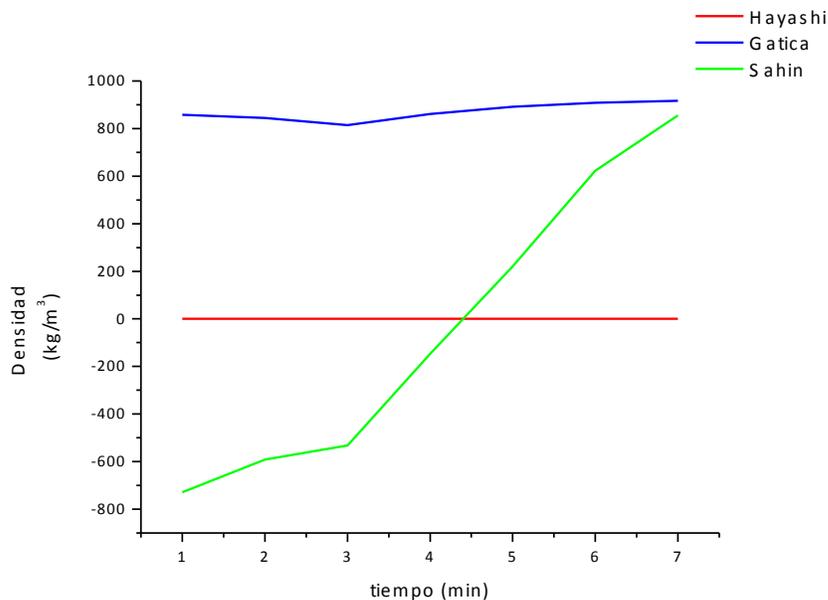


Figura 23. Comportamiento de la densidad con las ecuaciones de distintos autores

La ecuación de Hayashi solo toma en cuenta la temperatura superficial, los valores de densidad son muy pequeños y cambian muy poco conforme aumenta la

temperatura, por lo que se observa que el comportamiento de la densidad varía poco y se aprecia como si tuviera un comportamiento constante.

La ecuación de Sahin en temperaturas por debajo de los  $-22^{\circ}\text{C}$ , la densidad resulta en valores negativos, lo que es incoherente porque la densidad nunca puede ser negativa, cuando la temperatura se acerca a  $0^{\circ}\text{C}$  los valores de densidad se acercan a la densidad del hielo.

La ecuación de Hayashi no es aplicable ya que los valores son muy pequeños, menores que la densidad del aire  $1.22 \text{ kg/m}^3$ , si la escarcha es una combinación de hielo y aire, el valor de la densidad tendría que estar entre la densidad del hielo y el aire. En el caso de la ecuación de Sahin su intervalo de aplicación sería de  $-22^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$ , por lo que el valor de densidad aumenta al elevarse la temperatura. Cuando la temperatura es de  $0^{\circ}\text{C}$  el valor de densidad es de  $926.3 \text{ kg/m}^3$ , cuando la temperatura es  $-22^{\circ}\text{C}$  la densidad es de  $11.75 \text{ kg/m}^3$ . En el caso de la ecuación propuesta por Gatica, la densidad de la escarcha depende, entre otras variables, de la fracción volumétrica, por lo que si se considera a la escarcha como hielo sus valores deberían ser similares a los del hielo, en el caso de que aumente la porosidad disminuye la densidad debido a que aumenta el aire dentro de la escarcha disminuyendo su valor ya que el aire es un material menos denso. Se consideró que la ecuación que describe mejor a la densidad de la escarcha es la propuesta por Gatica porque toma en cuenta distintas variables para su determinación y no solo la temperatura.

Después de corroborar que las ecuaciones se pueden utilizar en superficies metálicas y seleccionar que ecuaciones son útiles se realizó el mismo procedimiento de cálculo en la carne de cerdo.

### **3.4 Escarcha en la carne de cerdo**

Al tomar en cuenta variables como temperatura superficial y propiedades del aire es posible aplicar las ecuaciones de la escarcha en otras superficies en este caso

carne de cerdo. La fracción volumétrica de hielo y el espesor se determinaron del mismo modo con imágenes digitales. La densidad, conductividad térmica y porosidad se evaluaron con ecuaciones empíricas en particular las correspondientes a los modelos de Gatica.

La fracción volumétrica de hielo en la carne fue diferente comparado con la placa metálica, el comportamiento presentó variaciones y se muestra a continuación en la Figura 24.

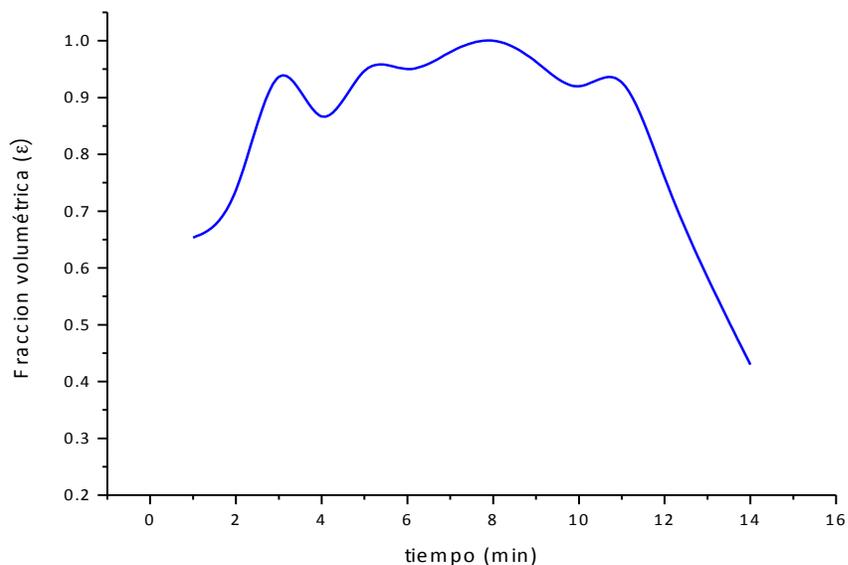


Figura 24. Variación de la fracción volumétrica en la carne de cerdo

La fracción volumétrica empieza en un valor de 0.65 después aumenta y presenta variaciones y después empieza a disminuir, esta disminución se debe a que la escarcha empieza a fundir y por lo tanto se disminuye la fracción y el espesor. La fracción es menor al inicio debido a que es la formación y por lo tanto la escarcha es más porosa, después se presenta la consolidación del hielo donde el aire ocluido dentro de la escarcha migra hacia la capa de escarcha, donde la humedad se condensa y se solidifica (Mannapperuma y Singh, 1987). Este comportamiento es el mismo que en la placa metálica. En el caso de la carne de cerdo la fusión es más lenta, y se refleja en el espesor y la fracción volumétrica, se alcanzan valores

más pequeños (0.43mm), y tarda más en fundir por completo comparado con la placa. El comportamiento de la fracción volumétrica en carne se puede deber a que “los aminoácidos polares de las proteínas poseen grupos cargados que interactúan fuertemente con el agua” (Freifelder, 1981) por lo tanto la fusión es más lenta y el espesor y la fracción no disminuyen tan drásticamente como en el caso de la placa metálica.

### 3.5 Espesor de la escarcha en la carne de cerdo

El espesor en el caso de la carne de cerdo al igual que la fracción volumétrica presenta comportamientos diferentes que la placa metálica, ya que tarda más en fundir como se puede observar en la Figura 25, el espesor máximo es de 0.8mm. Su valor de espesor inicial es de 0.31mm y final es de 0.1mm. Los valores de espesor inicial, máximo y final son mayores en la placa metálica.

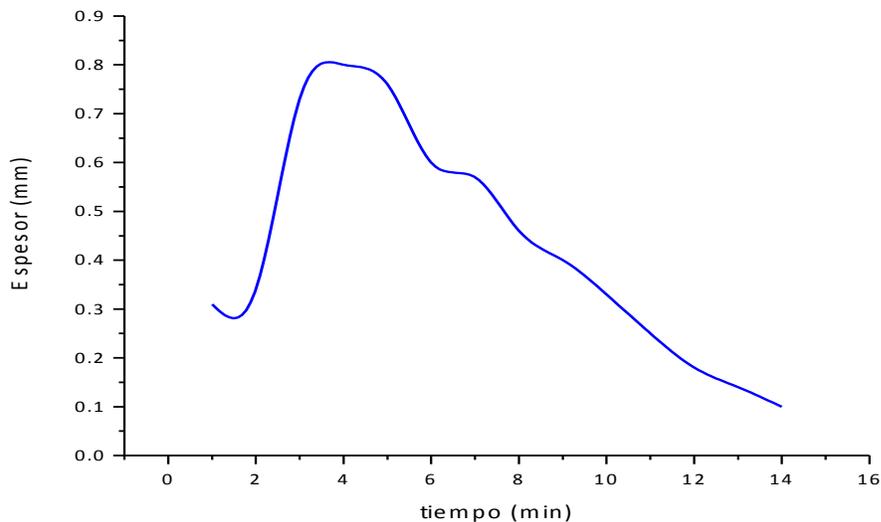


Figura 25. Variación del espesor en la carne de cerdo

El comportamiento del espesor es similar al que se presenta en la literatura, donde Mannapperuma y Singh (1987) presentan un modelo donde se evalúa en función al tiempo en descongelación; se presentan las fases de formación, consolidación, transición de fase y condensación. Los tiempos de fusión entre la placa metálica y

la carne son distintos, esto debido a que la carne es un material que tiene afinidad por el agua, las fibras y los poros permiten que el agua migre hacia el interior del alimento, lo que puede afectar a la deposición de la escarcha, mientras que el metal no. Además, tienen conductividades térmicas diferentes y esto genera que la transmisión del calor sea diferente en los materiales, lo que provoca la fusión más rápida en el metal. La conductividad térmica de la placa metálica, en este caso acero inoxidable, se reporta entre los 13.4 y 15.1 W/m °K (Incropera y De Witt, 1999), que es más alta en comparación con el de la carne. La conductividad térmica de la carne generalmente se calcula mediante ecuaciones, donde se toma en cuenta la temperatura y la composición química del alimento.

La relación entre el espesor y la fracción volumétrica es que a mayor espesor la fracción volumétrica disminuye, como se aprecia en el minuto 4. El espesor en la Figura 25 es de 0.8mm, en la Figura 24 la fracción disminuyó de 0.94 en el minuto 3 a 0.87 en el minuto 4. Esto es porque no se ha llevado a cabo la fase de consolidación donde el vapor de agua se condensa migra y se solidifica, por esto hay mayor contenido de aire, lo que genera que el espesor sea más grande, porque la estructura de la escarcha se asemeja más a la nieve. Posteriormente disminuye el espesor y la fracción volumétrica aumenta quedando solo hielo.

### **3.6 Conductividad térmica de la escarcha en carne de cerdo**

La conductividad térmica de la escarcha en la carne de cerdo se muestra en la Figura 26, en este material se tiene una consecuencia adversa a diferencia de las superficies metálicas, ya que en el alimento se generan problemas de deshidratación, cambios en sabor y color, que representan cambios químicos por interacción entre componentes y la escarcha.

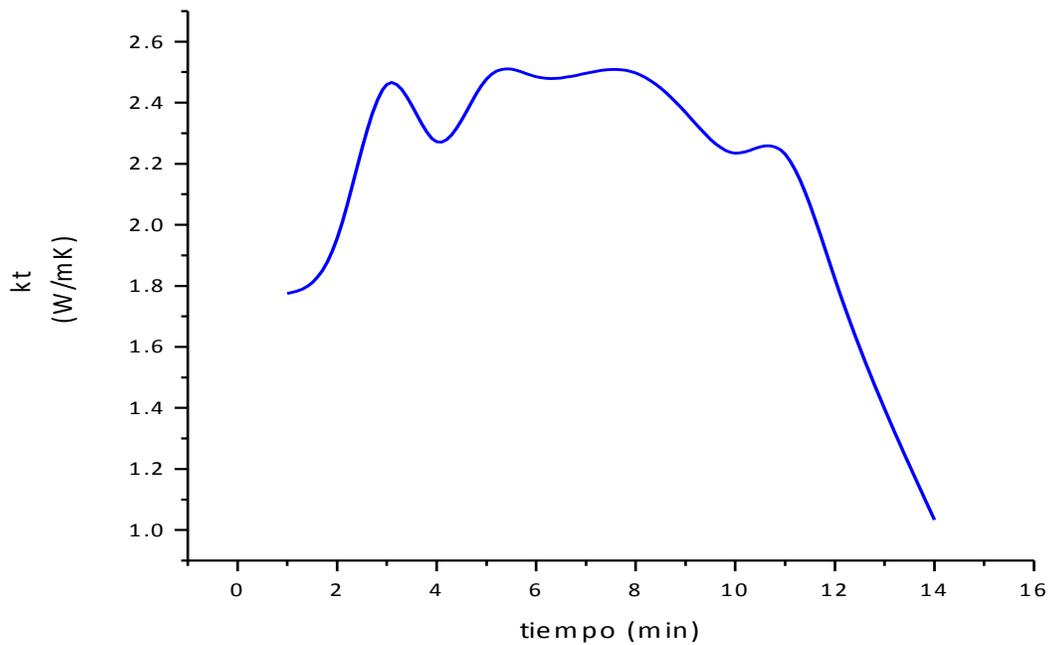


Figura 26. Variación de la conductividad térmica en la carne de cerdo

En el caso del alimento ocurre una sublimación inversa o ablimación, debido a que la presión de vapor del hielo en la superficie del alimento es mayor que la presión de vapor del agua en el aire (Ashy y James, 1973), generando que el agua sólida pase a una fase gaseosa. Este proceso se detiene hasta que en el alimento se forma una corteza que desempeña el papel de una barrera (Laguerre y Flick 2007).

Por eso el cálculo de la fracción volumétrica fue tan importante debido a que variables como la conductividad térmica dependen de la porosidad, y mientras más porosa sea la escarcha, indica que hay más aire, lo que provoca que la conductividad sea más baja, “haciendo que la escarcha funcione como un aislante y penalice la transferencia de masa y de calor” (Qu *et al.*, 2006) .

### 3.7 Densidad de la escarcha en carne de cerdo

Con el modelo propuesto por Mannapperuma y Singh (1987) se pueden explicar los cambios que suceden en la densidad ya que esta depende de la fracción volumétrica de hielo. En la Figura 27 se observa el comportamiento de la densidad basado en la ecuación propuesta por Gatica (2009).

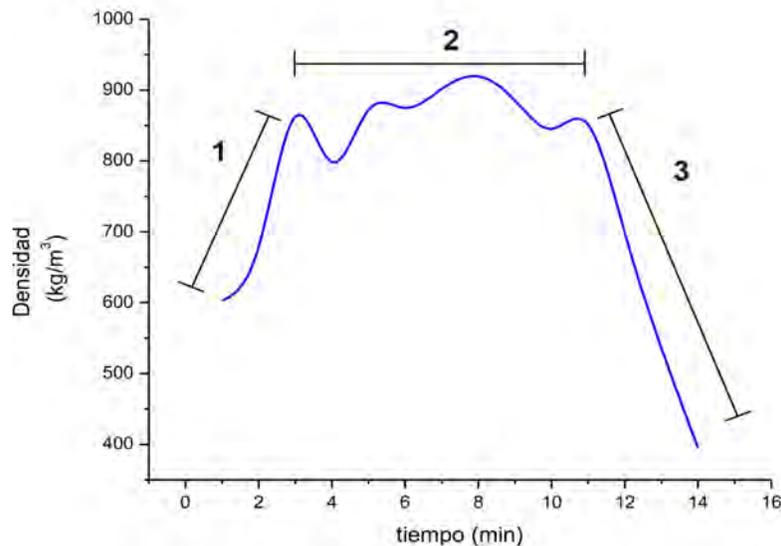


Figura 27. Densidad propuesta por Gatica en carne de cerdo

Se aprecia un periodo de formación que es cuando inicia el crecimiento de la escarcha (1), (esto se puede ver en la gráfica de espesor; Figura 25) y la densidad empieza a aumentar. En la siguiente fase de consolidación (2), el vapor de agua del aire empieza a condensar en líquido y a su vez esta agua migra hacia la capa de escarcha y se solidifica, por lo tanto, aumenta la densidad. En la fase de transición (3) el vapor de agua condensa como líquido y forma una capa de agua sobre la capa de hielo y por lo tanto se funde el hielo restante. Después la condensación del vapor de agua continúa durante esta etapa y termina cuando la temperatura de la interfase agua-aire alcanza el punto de rocío del ambiente.

### 3.8 Cambios cinéticos y estructurales de diferentes tipos de agua y de escarcha

La calorimetría diferencial de barrido modulado permitió observar los cambios térmicos entre los diferentes tipos de agua y el agua obtenida a partir de escarcha, así como los cambios estructurales, y cinéticos de las muestras. Las variables que permitieron explicar las diferencias fueron el flujo de calor total, no reversible, entalpía y  $C_p$ .

En la Figura 28 se presenta el termograma de flujo de calor total, donde se observan los cambios en las endotermas y el desplazamiento de temperaturas máximas de fusión de las muestras. Se hizo un calentamiento de las muestras para ver como cambiaba la fusión de los materiales. Las muestras en las que se realizaron las pruebas fueron agua desionizada, agua destilada, agua tridestilada, agua comercial (bonafont), y escarcha (que fue el agua obtenida de escarcha formada en una superficie metálica).

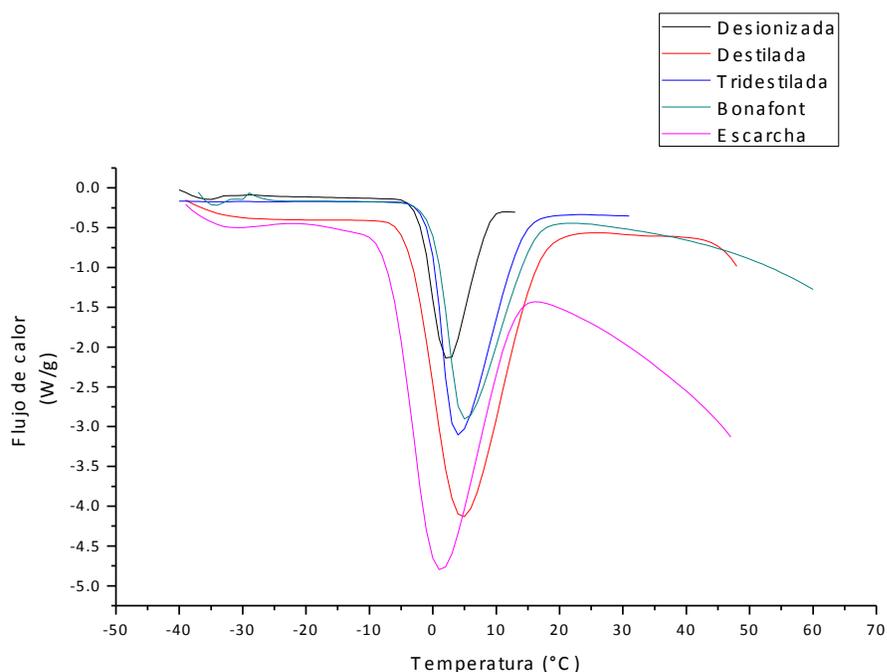


Figura 28. Termograma de flujo de calor de diferentes tipos de aguas.

En la congelación primero congela el agua pura y luego los solutos. En el caso contrario, cuando el material funde, los solutos son los primeros que se descongelan. El agua de escarcha que tiene la mayor cantidad de solutos y contaminantes, por ser la humedad del ambiente, es la primera que empieza a fundir a una temperatura de  $-13.58^{\circ}\text{C}$ , como se observa en el termograma de flujo de calor (Figura 28) y en la Tabla 2; también esos solutos son los que generan que se necesite mayor energía para fundir el hielo y por lo tanto el pico es mayor.

Teóricamente los diferentes tipos de agua tienen diferente contenido de compuestos, el agua tridestilada presenta valores de  $0.001\text{ mg/L}$  de sodio,  $0.01\text{mg/L}$  para fosfatos,  $0.001\text{ mg/L}$  para cloruros y  $0.003\text{ mg/L}$  para plomo. Mientras que los valores del agua destilada son de  $0.01\text{ mg/L}$  de sodio,  $0.1\text{ mg/L}$  para fosfatos,  $0.01\text{ mg/L}$  para cloruros y  $0.01\text{ mg/L}$  para plomo. En el agua desionizada se presentan valores de  $0.5\text{ mg/L}$  de sodio,  $0.5\text{ mg/L}$  de fosfatos,  $0.05\text{ mg/L}$  de cloruros y  $0.05\text{ mg/L}$  de plomo (Ecopura Queretaro, 2012).

En base a los datos de la literatura se esperaban comportamientos diferentes de los tipos de agua, esto quiere decir que los componentes que se mencionan anteriormente no son los que generan los cambios estructurales en los resultados de flujo de calor y  $C_p$ .

El agua desionizada es la que su fusión empieza a temperaturas más altas ( $-5.9^{\circ}\text{C}$ ), debido a que la cantidad de solutos y sales es menor en esta. Por lo tanto la cantidad de energía necesaria para fundir es menor y el pico es el menor de todos.

El agua comercial (Bonafont) al tener ciertos minerales como el sodio, genera que la fusión se presente antes, la energía necesaria para fundir sea mayor y el pico es mayor en comparación con el agua desionizada (Figura 28), debido a que la descongelación de los solutos es antes.

En el caso del agua destilada y tridestilada, las diferencias se deben a que el contenido de solutos es diferente en estas. El agua destilada contiene mayor cantidad de sales y minerales por eso se presenta antes la fusión a una temperatura de  $-10.01^{\circ}\text{C}$  en comparación con la temperatura del agua tridestilada ( $-7.42^{\circ}\text{C}$ ), también la energía necesaria para fundir es mayor en el caso del agua destilada.

Según Costa (2005), la variación de entalpía mide el intercambio de calor del sistema con el medio. El valor de entalpía es positivo cuando es una reacción que necesita energía para llevarse a cabo, en estos casos es fusión y se necesita energía para fundir el hielo. La entalpía ganada o pérdida por una muestra se determina integrando el área bajo la curva del flujo de calor (Reading y Hourston, 2006). En la Tabla 2 se muestran los valores de entalpía de cada tipo de agua, así como los valores iniciales, máximo y final de fusión.

Los cambios en las temperaturas de fusión son diferentes en el agua destilada y en la escarcha, el cambio en la escarcha empieza alrededor de una temperatura de  $-13.58^{\circ}\text{C}$ , y su temperatura máxima de fusión es a  $1.11^{\circ}\text{C}$ . En el agua destilada el cambio inicial es a  $-10.01^{\circ}\text{C}$  y su temperatura máxima de fusión es a  $4.68^{\circ}\text{C}$ . Estas diferencias en la temperatura de inicial de fusión son por la presencia de algún soluto como sales, minerales o contaminantes, los solutos presentes en la escarcha generan que la fusión sea a temperaturas más bajas comparado con el agua destilada. Mientras que la entalpía es un poco más grande en el agua destilada debido a que hay mayor intercambio de calor del sistema con el medio, debido a que el área de la zona de fusión es mayor.

Tabla 2. Valores de temperaturas y entalpía de fusión de distintos materiales.

Temperaturas de fusión				
Inicial	Maxima	Final	Entalpía	
°C	°C	°C	J/g	
-5.9	2.4	13.29	159.3	Desionizada
-10.01	4.68	23.03	277.2	Destilada
-6.86	4.03	19.87	319.9	Tridestilada
-7.42	5.13	22.46	294.9	Bonafont
-13.58	1.11	16.58	272.8	Escarcha

“En la composición del aire hay sustancias con diversas actividades químicas como el oxígeno, el bióxido de carbono y el agua, otras inactivas como el nitrógeno y los gases nobles. Los metales contaminantes más importantes en México, dada su toxicidad y abundancia son: mercurio, arsénico, plomo y cromo” (Covarrubias y Peña, 2017).

Hay diferencias entre los tipos de agua por lo que se observan cambios en los termogramas, estos cambios se expresan en las diferencias en los valores de entalpía así como el desplazamiento de las temperaturas de fusión. La presencia de algún componente presente en el aire que quede disuelto en el agua obtenida a partir de escarcha genera estos cambios tanto en el flujo de calor total como en las temperaturas de fusión.

En el Cp también se muestran los cambios entre las sustancias, en la Figura 29 se observan las diferencias entre los tipos de agua y el agua obtenida de escarcha.

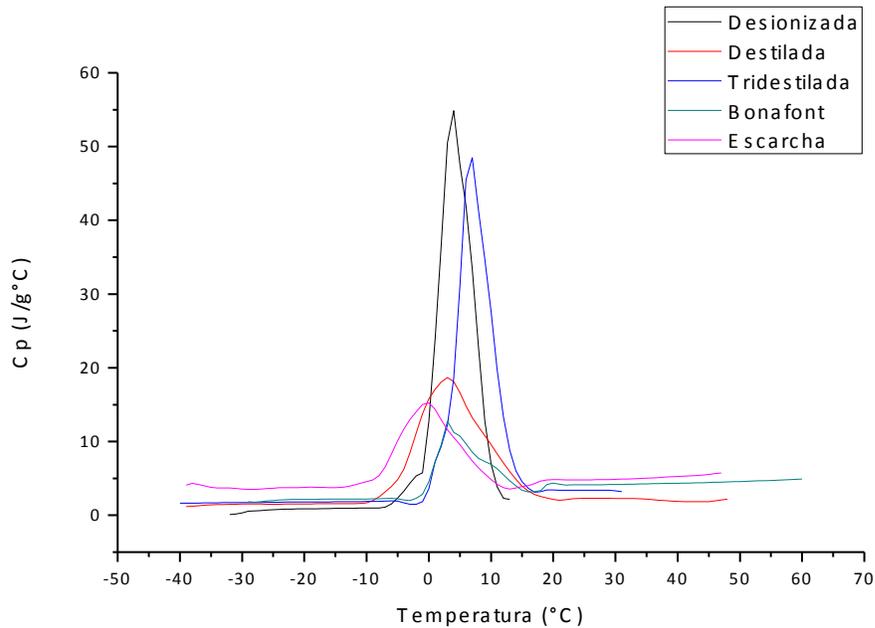


Figura 29. Termograma de los cambios en Cp de distintas muestras.

Çengel y Ghajar (2011) define al calor específico como la medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica, si el valor del Cp es más alto quiere decir que, se puede almacenar más energía por unidad de masa, por lo que el agua de escarcha almacena más energía térmica por eso sus valores de Cp son más altos que los diferentes tipos de agua fuera de los límites de fusión, esto porque algún componente presente en esta sustancia como pueden ser minerales o un compuesto del aire, generan que se necesite mayor energía para elevar la temperatura de la sustancia.

Los valores de Cp en el caso de agua de escarcha son los más altos, en la zona de baja temperatura y alta temperatura. Debido al contenido de sales y otras sustancias el agua de escarcha puede almacenar más energía térmica que las otras aguas.

En la zona de fusión, en el Cp de la escarcha y el agua destilada se puede observar la diferencia en las curvas de cada material, los valores iniciales de Cp de la escarcha son mayores que los del agua destilada en un intervalo de temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta alrededor de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Después ambas curvas empiezan a ascender, el pico máximo del agua destilada es mayor que el de la escarcha, esto quiere decir que el agua acumula mayor energía térmica que la escarcha en la fusión.

En los componentes que son flujo de calor total, y Cp se observa que el agua obtenida a partir de escarcha necesita mayor energía para fundir, y los valores de Cp son mayores, esto por la presencia de sales o algún componente del aire ambiental lo que genera esos cambios térmicos en este material.

## Conclusiones

La fracción volumétrica se determinó a partir del análisis de imágenes de escarcha, estableciéndose una metodología apropiada para su determinación. Al comparar su efecto sobre variables como la densidad, la conductividad térmica y la porosidad, se encontraron valores más reales que al suponer su valor, como muchos autores lo realizaron, lo que brindó confiabilidad en su determinación.

La repercusión más importante fue en la determinación de los cambios térmicos como son flujo de calor, al presentar cambios en las temperaturas de fusión en el  $C_p$  y entalpía de fusión, que muestra que la escarcha no es igual en su comportamiento térmico al agua destilada, desionizada, tridestilada y comercial, suponiéndose un efecto de la presencia de otros compuestos involucrados en la calidad del aire.

En los alimentos, el estudio es importante ya que se debería considerar la difusión del agua en ambos sentidos, tanto del agua ablizada que puede migrar hacia el interior del alimento, así como la contenida en el alimento la cual puede difundirse hacia la capa de escarcha afectando sus propiedades. Si el agua migra hacia el interior debe haber interacción con la composición del alimento como pueden ser proteínas y carbohidratos. La determinación de la fracción volumétrica en base a imágenes digitales se puede aplicar en el metal, pero hay que considerar esa difusión en el caso de la carne.

Tanto en los evaporadores como en los alimentos la escarcha representa una resistencia, en los primeros penaliza la eficiencia del equipo, en el caso de los segundos se ha manifestado que esta formación imparte cambios en olores y sabores suponiendo que sea por la composición del aire, por lo que hay que considerar evitar las fluctuaciones de temperatura en el almacenamiento en congelación o emplear envasados más eficientes.

## Referencias Bibliográficas

- Anderson, B.A., & Singh R.P. (2005). Moisture Diffusivity in Tylose Gel (Karlsruhe Test Material). *Journal of Food Science* 70. (5), 331-337.
- Ashy, B.H., & James, G.M. (1973). Effects of freezing and packaging methods on shrinkage of hams in frozen storage. *Journal of Food Science* 38. 255-257
- Barreiro, J., & Sandoval, A. (2006). Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Venezuela: Ed. Equinoccio.
- Barzanoni, Y., Noorshams, O., Basirat Tabrizi, H. & Damangir, E. (2011). Experimental investigation of frost formation on a horizontal cold cylinder under cross flow. *International Journal of Refrigeration*. 30 (4),1174-1180.
- Bedolla, S., Dueñas, C., Esquivel, I., & Favela, T. (2004). Introducción a la tecnología de alimentos, Mexico DF, México, Limusa.
- Biguria, G., & Wenzel, L. A. (1970). Measurement and correlation of water frost thermal conductivity and density. *I&EC Fund* 9 (1), 129-137.
- Braña, D., Ramírez, E., Rubio, M.S., Sánchez, A., Torrescano, G., Arenas, M.L., Partida, J.A., Ponce, E. & Ríos F.G. (2011). Manual de Análisis de Calidad en Muestras de Carne. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal. Folleto Técnico No.11
- Çengel, Y A. & Cimbala, J.M. (2006.) Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, 1ª edición, McGraw-Hill
- Çengel, Y.A., & Ghajar, A.J. (2011). Transferencia de calor y masa Fundamentos y aplicaciones, España. Mc Graw Hill
- Cheng, C.H., & Cheng, Y.C. (2011) Predictions of frost growth on a cold plate in atmospheric air. *International Communications on Heat and Mass Transfer* 28 (7). 953-962.
- Cheng, C.H., & Shiu, C.C. (2002). Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45: 4289-4303.

- Cheng, C.H., & Wu, K.H. (2003). Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow. *J. Heat Transfer* 125, 95–102.
- Costa, J.M. (2005). Diccionario de Química Física. España. Diaz de Santos.
- Covarrubias, S.A., & Peña Cabrales, J.J. (2017). Contaminación Ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 33. 7-21.
- Cui, J., Li, W.Z., Liu, Y. & Zhao, Y.S. (2011). A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition,"*Int. J. Heat Fluid Flow*, 32, 249–260.
- Díaz, V.S., & Barreneche, R.O. (2005). Acondicionamiento térmico de edificios. Argentina: Nobuko.
- Dorado, E. (2011). Acondicionamiento de la carne para su comercialización Malaga, España, Ic editorial.
- Ecopura Queretaro (2012). Recuperado de: <http://www.ecopura.com.mx/agua-destilada-agua-desionizada-agua-bidestilada-agua-tridestilada>
- Fellows, P.J. (2000). Tecnología del Procesado de los Alimentos: Principios y Prácticas. Acribia, Zaragoza, España, 575 pp.
- Fossa, M., & Tanda, G. (2010). Frost formation in vertical channels under natural convection. *International Journal of Multiphase Flow*, 36, 210-220.
- Freifelder, D. (1981). Técnicas de bioquímica y biología molecular. Barcelona, España Editorial Reverté, S.A.
- Gatica, J., Pita, V. & Brum, N.C. (2005). Correlación de interés en la formación de escarcha sobre superficies frías. VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional.
- Gatica, J., Pita, V. & Lobo, N. (2009). Simulación del depósito de escarcha en superficies frías. *Información Tecnológica* 20 (2), 113-126.
- González R. (2013). Criogenia Cálculo de equipos Recipientes a presión, Ediciones Díaz de Santos, 866pp.

- Hansen, E., Lauridsen, L., Skibsted, L., Moawad, R. and Andersen, M. (2004). Oxidative stability of frozen pork patties: Effect of fluctuating temperature on lipid oxidation. *Meat Science* 68: 185-191.
- Hayashi, Y., Aoki, A., Adachi, S., & Hori, K. (1977). Study of frost properties correlating with frost formation types. *ASME Journal of Heat Transfer* 99, 239–245.
- Heldman, D.R. & Härtel, R.W. (1997). Principles of food processing, *Nueva York, EUA*, Chapman & Hall.
- Heldman, D.B., & Lund, D. (2007). Handbook of food engineering, Boca Raton, EUA, CRC.
- Hermes, C., Piucco, R., Barbosa, J., & Melo, C. (2009). A study of frost growth and densification on flat surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 371-379.
- Hobbs, P.V. (1974). Ice physics. Clarendon Press. Oxford p. 461 en Sahagian M. E. y Goff, H. D. 1996. Fundamental aspects of the freezing process. En L. E. Jeremiah (Ed.) Freezing effects on food quality. Marcel Dekker, Inc. Nueva York, EE. UU.
- Huang, J., & Cho, K. (2014). Numerical prediction of frost properties and performance of fin-tube heat exchanger with plain fin under frosting, *Int. J. Refrig.* 46, 59-68.
- Incropera, F.P., & De Witt, D.P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor, México, Prentice Hall.
- Kandula, M. (2011). Frost growth and densification in laminar flow over flat surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (15–16), 3719–3731.
- Kim, K.H., Ko, H.J., Kim, K., Kim, Y., & Cho, K. (2009). Analysis of heat transfer and frost layer formation on a cryogenic tank wall exposed to the humid atmospheric air. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2072-2079.
- Kobs L. (1997). Designing frozen foods. *Food Prod Design* January: 27–43.

- Laguerre, O., & Flick, D. (2007). Frost formation on frozen products preserved in domestic freezers. *Journal of Food Engineering*, 79, 124-136.
- Lee K.S., Kim, W.S., & Lee, T.H. (1997). A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40, 4359–4365.
- Lee, Y. & Ro, S. (2005). Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation. *Experimental Thermal and Fluid Science* 29, 685-696.
- Le Gall, R., Grillot, J.M. & Jallut, C. (1997). Modeling of frost growth and densification. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 40 (2). 3177-3187.
- Lenic, K. Trp, A. & Frankovic, B. (2009). Transient two-dimensional model of frost formation on a fin-and-tube heat exchanger. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 52, (1–2), 22–32.
- Luer, A. & H. Beer; (2000). Frost deposition in parallel plate channel under laminar flow conditions. *Int. J. Thermal Science*, 39, 85-95.
- Mannapperuma, J.D., & Singh, R.P. (1987). Thawing of frozen foods in humid air. *International Journal of Refrigeration*, (11), 173-186
- Melendez, R., Rosas, M., Mercado, C., Velázquez, R., & Arjona, J.L. (2011). Comparison of melting frost layer after 2 frozen methods in pork cuts (longissimus dorsi). *Procedia Food Science*, (1), 363-369.
- Na, B., & Webb, R.L. (2004). A new model for frost growth, *International Journal of Heat Mass Transfer* 47 (5) 925-936.
- Nelson, J. (2001). Growth mechanism to explain the primary and secondary habits of snow crystals, *Philos. Magazine A* 81 2337–2373.
- O’Neal, D.L., & Tree, D.R. (1984). Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry. *ASHRAE Transactions* 90, 278–290.
- Orrego, C. (2008). Congelación y Liofilización, Ed. Artes Gráficas Tizan Ltda Manizales, Colombia, 150 pp.
- Osmonics Pure Water Handbook. (1997). 2a Edición.

- Pascual, M.R., & Calderón, V. (2000). *Microbiología Alimentaria*, Madrid, España, Diaz de Santos
- Perry, R. H., Green, D. W. & Maloney, J. O. (1999). *Perry's Chemical Engineers handbook*. Ed. McGraw-Hill, septima edición. ISBN 0-07-049841-5.
- Piucco, R.O., Hermes, C.J.L., Melo, C., & Barbosa J.R., (2008). A study of frost nucleation on flat surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 1710–1715.
- Poovarodom, N., Letang, G., Bouvier, J., & Billiard, F. (1990). Influence de l'emballage et des fluctuations de temperature de conservation sur la qualite´ des denrees alimentaires surgele´es, IIF, Paris, Coll. Science et technique du froid. In *Progre`s dans la science et la technique du froid en industrie alimentaire* (pp. 559–567).
- Qu K, Komori S & Jiang Y. (2006). Local variation of frost layer thickness and morphology. *International Journal of Thermal Sciences*. 45, 116-123.
- Reading, M., & Hourston, D.J. (2006). Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry. Theoretical and Practical Applications in Polymer Characterisation. *Hot Topics in Thermal Analysis and Calorimetry*. 6
- Sahin, A.Z., (2000). Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth period. *Int. Journal of Heat an Mass Transfer*. 43, 539-553.
- Sami, S.M., & Duong, T. (1989). Mass and heat transfer during frost growth, *ASHRAE Transactions* 158–165.
- Schmidt, S.J., & Lee, J.W., (2009). How does the freezer burn our food? *Journal of Food Science Education*. 8, 45-52
- Tao, Y.X., Besant, R.W., & Mao, Y. (1993). Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period, *ASHRAE Transactions: Symposia*, CH-93-2-2, 746–753.
- Thomas, C.L. (2005a). Modulated DSC® Paper #1 Why Modulated DSC®; An Overview and Summary of Advantages and Disadvantages Relative to Traditional DSC. TA Instruments

- Thomas, C.L. (2005b). Modulated DSC® Paper # 2 Modulated DSC® Basics; Calculation and Calibration of MDSC® Signals. TA Instruments
- Thomas, C.L. (2005c). Modulated DSC® Paper # 3 Modulated DSC® Basics; Optimization of MDSC® Experimental Conditions. TA Instruments
- Tokura, I., Saito, H., & Kishinami, K., (1983). Study on properties and growth rate of frost layers on cold surfaces. *ASME J. Heat Transfer* 105, 895–901.
- Treybal, R. (1980). Operaciones de transferencia de masa. Buenos Aires, Argentina, McGraw-Hill.
- Vanhaecke, L., Verbeke, W. & De Brabander ,H.F. (2010). Glazing of frozen fish: analytical and economic challenges. *Anal Chim Acta*. 672(1-2):40-44.
- Verdonck, E., Schaap, K., & Thomas, L.C. (1999). A discussion of the principles and applications of Modulated Temperature DSC (MTDSC). *International Journal of Pharmaceutics* 192. 3-20.
- Wang, W., Guo, Q.C., Feng, Y.C., Lu, W.P., Dong, X.G. & Zhu, J.H. (2013). Theoretical study on the critical heat and mass transfer characteristics of a frosting tube. *Appl. Therm. Eng.*, 54 (1), 153–160.
- Wang, C.C., Huang, R.T., Sheu W.J. & Chang, Y.J. (2004). Some observations of the frost formation in free convection: With and without the presence of electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47: 3491-3505.
- Yonko, J.D., & Sepsy, S.F. (1967). An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate, *ASHRAE Trans.* 73 (2) 1.1–1.11.