



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

COMPORTAMIENTO DE LA FORMACIÓN-FUSIÓN DE
ESCARCHA DE HIELO SOBRE CARNE PORCINA
CONGELADA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

JUAN PABLO CASTILLO LÓPEZ

ASESORES: M. EN C. ROSALÍA MELÉNDEZ PÉREZ

I. A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS

CUAUTITLÁN IZCALLI. 2014



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

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
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 a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Comportamiento de la formación-fusión de escarcha de hielo sobre carne porcina congelada

Que presenta el pasante: Juan Pablo Castillo López
Con número de cuenta: 304066465 para obtener el Título de: Ingeniero 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 HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de octubre de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en C. Rosalía Meléndez Pérez	
VOCAL	Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza	
SECRETARIO	M. en C. Víctor Manuel Avalos Avila	
1er. SUPLENTE	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	
2do. SUPLENTE	M. en C. Juana Gutiérrez Bautista	

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

*Es verdad, la vida es muy injusta.
Siempre nos da más de lo que necesitamos...*

*No esperes grandes recompensas,
Si no has hecho grandes esfuerzos...*

Para ascender, hay que descender...

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque el milagro del mundo no pudo haberse creado por sí mismo.

Agradezco plenamente a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme el privilegio de pertenecer a sus caudales de conocimiento, libertad y autonomía. A la cual le debo todo lo que soy, siempre estaré en deuda.

A mi madre, por tus innumerables sacrificios y dejarlo todo en tu pueblo de gente humilde y sencilla, porque me enseñaste a escuchar y no creerlo todo, por alimentarme cada día y darme tu legado de amor sin límites, este logro es tuyo.

A mi padre, por soportar todos los retos y distancias, marchándote de tu pueblo frutal lleno de personas sabias con historias que contar, gracias por infundirme el valor de la justicia y guiarme con inteligencia, este logro es tuyo también.

A la maestra Rosalía, por creer en mí y brindarme esta maravillosa oportunidad, por todo su apoyo incondicional para que pudiera asistir al Congreso Internacional de la Carne, sus clases de estadística, por compartirme los artículos científicos cuasi-imposibles de obtener, gracias por todo.

Al Ing. Alfredo por su valiosa aportación para la redacción de este trabajo, las imborrables clases de frío que fueron tan útiles en mi vida laboral y profesional.

A todos y cada uno de mis compañeros de carrera a Mara Nieto, Alan Osorio, Gina Centeno, Alberto Zuñiga, Yazmín López, Itandehui Cruz, Jovani Domínguez, Ilsa Ramírez, Ignacio Guerrero, Yenifer Cortés, Said Rábago, Ivonne Martínez, Dulce Parrales, Ricardo Real, Leslie Rodríguez, Tannia Dorantes; por tantas fiestas, dolores y experiencias que compartimos en la FES, son tantas cosas que las palabras no alcanzan.

A Carla María Blanco por ser un pilar fundamental y desarrollo de este pequeño paso, por estimularme a dar lo mejor de mí, no tienes idea de cuanto admiro tu corazón, por compartir juntos la universidad y los mejores momentos de mi vida, te amo.

Por último y no por ello menos importante, quiero agradecer especialmente a todos los investigadores y científicos, quienes consagran su vida a la verdadera búsqueda de respuestas y soluciones, dado que sin su valiosa labor éste trabajo no habría sido posible.

ÍNDICE

RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	vii
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
1.1 Carne porcina	1
1.2 Proceso de congelación de alimentos	3
1.2.1 Velocidad de congelación	8
1.2.2 Congelación criogénica	10
1.2.3 Efectos de almacenamiento congelado	13
1.3 Psicrometría del aire	17
1.4 Formación de escarcha de hielo	21
1.4.1 Mecanismo de formación de escarcha	22
1.4.2 Etapas de formación-fusión de escarcha por ablimación	24
Etapa 1) Formación de escarcha de hielo	24
Etapa 2) Consolidación de escarcha	25
Etapa 3) Transición de fase	26
Etapa 4) Condensación	27
Etapa 5) Evaporación	27
Etapa 6) Secado	27
1.4.3 Influencia de las variables en la formación de escarcha	28
1.4.4 Estructura del cristal de hielo	31
1.4.5 Propiedades termofísicas de la escarcha	33
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	36
2.1 Descripción experimental	36
2.2 Características y control de materia prima	38
2.3 Actividades preliminares	39
2.3.1 Medición de humedad relativa dentro de la cámara y en el ambiente	39
2.3.2 Medición de velocidad del aire dentro de la cámara de congelación	39
2.3.3 Cálculo de velocidad de congelación	40
2.3.4 Determinación de tiempos de congelación de cortes de carne porcina con Nitrógeno	40
2.4 Actividades particulares	41
2.4.1 Evaluación del efecto del tiempo de congelación con nitrógeno	41
2.4.2 Evaluación del efecto del tiempo de congelación durante el periodo de estabilización en cámara	42
2.4.3 Determinación del efecto del cambio de humedad relativa por la apertura	42

y cierre de puerta de cámara	
2.4.4 Determinación de espesor de escarcha	43
2.4.5 Cálculo de propiedades termofísicas	43
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	44
3.1 Actividades preliminares	44
3.1.1 Resultados de medición de velocidad del aire	44
3.1.2 Resultados de tiempos de congelación criogénica de cortes de carne Porcina	45
3.2 Efecto del tiempo de congelación criogénica	46
3.2.1 Temperatura superficial de escarcha	46
3.2.2 Espesor de escarcha	47
3.2.3 Influencia de la humedad relativa	49
3.2.4 Comportamiento de formación-fusión de escarcha	49
3.3 Propiedades termofísicas	51
3.3.1 Porosidad de la escarcha por contenido de aire	51
3.3.2 Densidad de escarcha	53
3.3.3 Conductividad de escarcha	58
3.4 Efecto de congelación criogénica y estabilización en cámara	62
3.4.1 Forma de los cristales de hielo	62
3.4.2 Comparación de propiedades termofísicas de escarcha	64
3.4.2.1 Porosidad de la escarcha	64
3.4.2.2 Densidad de escarcha	64
3.4.2.3 Conductividad termica de escarcha	65
3.5 Efecto de apertura y cierre de puerta en cámara de congelación	67
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estructura del músculo estriado (Arteria I. España, 2011).	1
Figura 2.	Comportamiento de congelación para agua pura (Sun, 2006).	5
Figura 3.	Comportamiento de la congelación para alimentos (Fellows, 2007).	6
Figura 4.	Velocidad de congelación lenta y rápida. Adaptada de Fellows (2000).	8
Figura 5.	Comparación de carne fresca y deshidratada (Schmidt y Lee, 2009).	17
Figura 6.	Fenómeno habitual del punto de rocío (Hermet, 2011).	18
Figura 7.	Disposición general de la carta psicrométrica (Himmelblau 2002).	19
Figura 8.	Humidificación indirecta del aire. Adaptada de Himmelblau (2002).	20
Figura 9.	Condensación del vapor de agua. Adaptada de Himmelblau (2002).	22
Figura 10.	Representación psicrométrica de la formación de escarcha (Hermes <i>et al.</i> , 2009).	23
Figura 11.	Mezcla de aire frío y caliente. Adaptada de Himmelblau (2002).	23
Figura 12.	Perfil de temperaturas (Mannapperuma y Singh, 1987).	25
Figura 13.	Perfil de temperaturas durante transición de fase (Mannapperuma y Singh, 1987).	26
Figura 14.	Efecto de humedad relativa en escarcha (Cheng y Shiu, 2002).	29
Figura 15.	Formación de cristales de escarcha (Cheng y Shiu, 2002).	30
Figura 16.	Efecto de la temperatura del refrigerante en escarcha (Cheng y Shiu, 2002).	31
Figura 17.	Principales estructuras de cristales de hielo (Sahin, 2000).	31
Figura 18.	Crecimiento de cristales a diferentes ambientes. (Qu <i>et al.</i> , 2006).	33
Figura 19.	Cuadro metodológico.	37
Figura 20.	Medidas del corte de lomo de cerdo.	38
Figura 21	a) Zonas de la cámara de congelación	39
	b) Fotografía de cámara de congelación por convección forzada.	39
Figura 22.	Posición del termopar en el corte de carne porcina.	40

Figura 23	a) Acomodo de cortes de carne sobre la charola metálica.	41
	b) Recipiente Dewar.	41
Figura 24.	Estereomicroscopio LEICA	42
Figura 25.	Medición de espesor de escarcha.	43
Figura 26.	Curva de congelación criogénica para muestra 1.	45
Figura 27.	Gráfica para distintos tiempos de congelación criogénica.	46
Figura 28.	Formación de escarcha en función al tiempo de congelación criogénica	47
Figura 29.	Gráfico de caja para congelación criogénica.	48
Figura 30.	Espesor de escarcha respecto a variaciones de humedad relativa.	49
Figura 31.	Variación del espesor respecto al tiempo de congelación criogénica	50
Figura 32.	Modelo de variación del espesor de escarcha respecto al tiempo (Mannapperuma y Sigh, 1987).	50
Figura 33.	Porosidad de la escarcha por contenido de aire.	52
Figura 34.	Comparación de ecuaciones de densidad respecto al tiempo.	54
Figura 35.	Variación de la conductividad térmica (Gatica et al., 2009).	58
Figura 36.	Variación de la conductividad térmica durante descongelación.	60
Figura 37.	Forma de cristales de hielo formados por congelación criogénica y cámara.	63
Figura 38.	Comparación de porosidad con nitrógeno y cámara.	64
Figura 39.	Comparación de densidad con nitrógeno y cámara.	65
Figura 40.	Comparación de conductividad térmica con nitrógeno y cámara.	65
Figura 41.	Gráfica de caja para congelación con cámara.	66
Figura 42.	Comportamiento de temperaturas dentro cámara.	68
Figura 43.	Réplica de carne congelada sin escarcha.	68
Figura 44.	Gráfica de caja para apertura y cierre de puerta de cámara.	69
Figura 45.	Gráfica de caja comparativa.	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Composición química de carne diferentes especies (Solís et al., 2000).	2
Tabla 2	Propiedades de nitrógeno líquido (Fellows, 2007).	10
Tabla 3	Variación de la forma del cristal con la temperatura (Sahin, 2000).	32
Tabla 4	Ecuaciones de predicción de propiedades termofísicas de escarcha.	34
Tabla 5	Velocidad del aire en diferentes zonas de la cámara de congelación..	44
Tabla 6	Comparación de la densidad de escarcha según ecuaciones de predicción	53
Tabla 7	Densidad de hielo respecto al tiempo ecuación de Gatica et al. (2009).	56
Tabla 8	Monitoreo de apertura y cierre de puerta en cámara de congelación.	67

RESUMEN

En este trabajo se evaluó la formación y fusión de escarcha, determinando el efecto del tiempo de congelación, la apertura y cierre de puerta de cámara y las variaciones de humedad relativa sobre cortes de lomo de cerdo (*Longissimus dorsi*), así como, el “periodo de estabilización de temperatura” el cual se define como el paso de una congelación criogénica seguido del almacenamiento de la carne en cámara de congelación. La escarcha está compuesta por hielo poroso lleno de aire, con baja conductividad térmica, que actúa como aislante disminuyendo la transferencia de calor. Algunos estudios han analizado el efecto de la velocidad del aire, la humedad relativa y temperatura del medio sobre el espesor de escarcha. Sin embargo, estas investigaciones están limitadas a placas y equipos metálicos. Por otro lado, en el área de alimentos principalmente en carne, se ha concluido que el fenómeno de formación de escarcha puede provocar deshidratación superficial, pérdidas de peso y cambios en color, textura y sabor. Se utilizaron nueve lotes de cuatro cortes de cerdo de 0.5 cm de espesor, se congelaron mediante contacto indirecto con nitrógeno líquido y posteriormente se introdujeron en una cámara de congelación. Los cortes congelados se colocaron en un estereomicroscopio LEICA® con 35x de aumento donde se observó la formación de escarcha; se midieron la temperatura superficial y la humedad relativa. También se tomaron fotografías cada minuto hasta que la escarcha se fundió. El espesor de escarcha fue determinado mediante el programa Adobe Photoshop CS5, para esto se traslapó la imagen final en la donde se llevó a cabo la fusión de escarcha sobre la imagen inicial. A menor temperatura superficial y mayor humedad relativa, se obtuvo un mayor espesor de escarcha sobre la carne porcina; además se calcularon las propiedades termofísicas como: porosidad, densidad y conductividad para determinar el comportamiento de la escarcha. Este estudio permite analizar el efecto de las condiciones del manejo de alimentos congelados, tanto en equipos de almacenamiento como durante el transporte donde debe mantenerse la cadena de frío. Este trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Análisis Térmico y Estructural de Alimentos, UIM-L13 Campo IV, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.

INTRODUCCIÓN

La formación de escarcha de hielo es un fenómeno muy común, que puede encontrarse en diversos campos como aeronáutica, criogenia (Kim *et al.*, 2009), criocirugía, meteorología, agricultura e ingeniería civil (Lee y Ro, 2005), principalmente en superficies y dispositivos que trabajan a temperaturas menores a 0 °C, por ejemplo, en sistemas de aire acondicionado y en cámaras industriales de refrigeración y congelación (Cheng y Shiu, 2002), incluso en refrigeradores domésticos.

El aire en el interior de una cámara de congelación tiene una temperatura de rocío que depende de la temperatura de bulbo seco y de la humedad relativa. Mientras la temperatura de rocío sea mayor que la temperatura de una superficie fría, el vapor de agua no se condensará; sin embargo, si la temperatura de rocío es menor que la temperatura de una superficie fría, en consecuencia el vapor de agua se condensará (Emerson, 2009). Si la temperatura de la superficie fría es menor a 0° C, entonces se presentará el fenómeno de formación de escarcha de hielo sobre la superficie fría (Cheng y Shiu, 2002). Dicho fenómeno ha adquirido importancia, debido a que Emery y Siegel (1990) concluyeron que la formación de escarcha de hielo provoca una disminución en la transferencia de calor del 50 al 75% en los equipos de congelación, la escarcha actúa como un aislante, es decir, posee conductividad térmica muy baja, puesto que está compuesta por hielo poroso lleno de aire (Kim *et al.*, 2009).

Las propiedades físicas espesor y densidad, termofísicas como conductividad térmica y temperatura de interface escarcha-aire, se incrementan con el tiempo durante el crecimiento de la escarcha, disminuyendo las velocidades de transferencia de masa y de calor (Mannapperuma, 1987); esto es importante porque un mayor espesor de escarcha representa una resistencia térmica que aumentará el tiempo de congelación y el costo de la operación. Actualmente, resulta de gran interés reducir los consumos de energía utilizados en las cámaras de conservación de alimentos (Gatica y Pita, 2008).

Para reducir el tiempo de congelación y la pérdida de agua del alimento, se ha usado la congelación criomecánica, que consiste en dos pasos: la congelación del alimento con

nitrógeno e inmediatamente después el alimento se introduce dentro de una cámara. Este método combinado incrementa la capacidad de congelación (Agnelli y Mascheroni, 2001).

La formación de escarcha ha sido estudiada por Cheng y Shiu, (2002) y Wang *et al.*, (2004), quienes analizaron el efecto de variables tales como: la velocidad del aire, la humedad relativa y temperatura del medio; así mismo proponen un modelo de comportamiento que predice el crecimiento de la escarcha de hielo. Sin embargo, estas investigaciones están limitadas a placas y equipos metálicos. Además, en 1987, Mannapperuma y Sigh concluyeron que la estructura cristalina y porosa de la escarcha dificulta un análisis teórico, del mismo modo, su fragilidad y ligereza hacen compleja la experimentación. Los efectos de la escarcha no han sido estudiados en el área de alimentos, por tanto, es necesario comprender el proceso de formación y fusión de la escarcha sobre éstos, por la cual en este trabajo se investigó la formación de escarcha sobre cortes de lomo de cerdo (*Longissimus dorsi*).

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 Carne porcina

Desde el punto de vista bromatológico, la carne es el resultado de la transformación experimentada por el tejido muscular del animal a través de una serie concatenada de procesos fisicoquímicos y bioquímicos que se desarrollan como consecuencia de la muerte del animal (Astiasarán y Martínez, 2000). De acuerdo a las Normas Oficiales Mexicana NOM-009-ZOO-1994, y la NMX-FF-081-SCFI-2003, la carne es definida como la estructura compuesta por fibra muscular estriada, acompañada o no de tejido conjuntivo elástico, grasa, fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos, que constituyen las masas musculares que cubren el esqueleto del animal, de las especies autorizadas para el consumo humano, en este caso de ganado porcino.

La carne se compone de músculos estriados. Estos músculos constan de fibras musculares tubulares y largas que pueden alcanzar 30 cm de longitud y su forma es muy semejante a los hilos. Estas fibras están rodeadas por una membrana excitable eléctricamente denominada sarcolema; las fibras musculares o miofibrillas se conectan al tejido conectivo, a través del cual el músculo ejerce su tracción, es decir, éste se contrae voluntariamente y es responsable del movimiento del animal. En la figura 1 se pueden observar las miofibrillas.

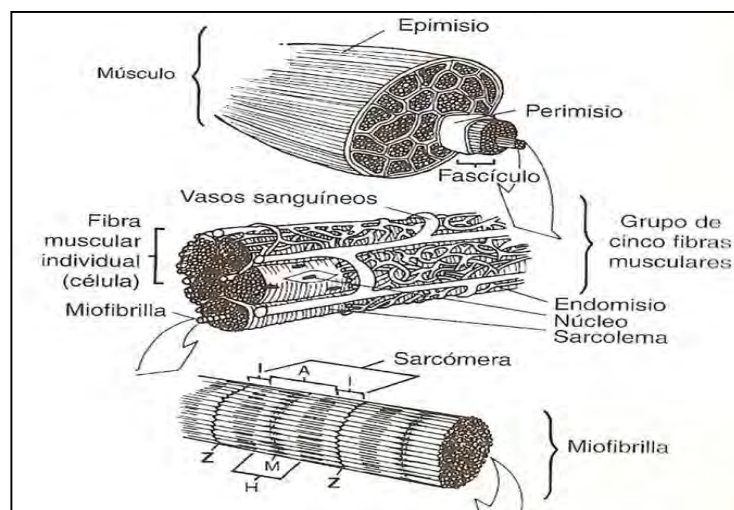


Figura 1. Estructura del músculo estriado (Arteria I., 2011).

Una fibra a su vez, está formada por muchas miofibrillas paralelas, cada una de un diámetro de 1µm aproximadamente. Las miofibrillas están sumergidas en el sarcoplasma, que es el fluido intracelular. El sarcoplasma contiene glucógeno, ATP, fosfocreatina y enzimas glucolíticas, todos estos constituyen el combustible con el que el músculo puede moverse. Si se observa una micrografía electrónica de la sección longitudinal, se observa que existe una estructura que se repite cada 2.3 µm la cual se denomina sarcómero (Carballo y López de Torre, 2001). Por su parte, la miofibrilla está compuesta de filamentos paralelos, alternativamente gruesos y delgados de miosina y actina respectivamente; es la disposición de estos filamentos la que le confiere a la miofibrilla su aspecto estriado o rayado (Cheftel y Cheftel, 1976).

La carne no tiene una composición uniforme para todo el ganado, dependiendo de la especie y de la nutrición de la misma, la carne contiene de un 15 a 20% de proteínas, destacándose: miofibrilares (miosina, actina y troponina), sarcoplásmicas (enzimas de la glicolisis, mioglobina) y del estroma (colágeno, elastina, reticulina y tropomiosina); las proteínas de la carne contienen todos los aminoácidos esenciales. En ésta también se encuentran sustancias nitrogenadas (purinas y pirimidinas) procedentes de la hidrólisis de los ácidos nucleicos, sustancias nitrogenadas no proteicas (betaínas) y una fracción que contiene fosfatos de calcio, potasio y magnesio así como cloruro sódico y férrico. El músculo representa del 40 al 65% del peso total del animal, y de éste aproximadamente el 65% es agua. (Pardo *et al.*, 1998). La carne de lomo de cerdo contiene mayor cantidad de agua, la cual se convierte en cristales de hielo durante la congelación, ver tabla 1.

Tabla 1. *Composición química de carne diferentes especies.*

Fuente	Proteínas (%)	Grasas (%)	Cenizas (%)	Agua (%)
Vaca	17.5	22	0.5	60
Ternera	19	14	1	66
Lomo de cerdo	20.3	7.8	1.2	70.7

(Solís *et al.*, 2000)

1.2 Proceso de congelación de alimentos

La congelación es una operación unitaria en la que la temperatura del alimento se reduce por debajo de su punto de congelación, mediante la cual el agua que contiene el alimento (en carne ésta es mayor al 40%) cambia de estado formando cristales de hielo para la conservación de alimento, esto con el fin de alargar su vida útil. La inmovilización del agua en forma de hielo y el aumento de la concentración de los solutos en el agua no congelada reduce la actividad de agua del alimento a valores cercanos a cero; la conservación del alimento se logra por un efecto combinado de las bajas temperaturas y la disminución de la actividad de agua (Fellows, 2007).

La congelación de alimentos, se lleva a cabo mediante dos etapas necesarias: la primera es la nucleación, dónde se forman los cristales de hielo, posteriormente se lleva a cabo el crecimiento de los mismos.

Si se tiene un sistema con hielo y agua líquida a presión atmosférica y éste se encuentra a la temperatura de congelación del agua pura $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, sino se agrega ni se retira energía a la mezcla la cantidad de hielo permanecerá constante, puesto que el punto de congelación del agua (o punto de fusión del hielo) es un punto de equilibrio. Por tanto, si el agua es enfriada hasta $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ésta no se congelará, para esto es preciso alcanzar temperaturas por debajo del punto de congelación para que comience la formación de cristales de hielo, a éste fenómeno se le conoce como subenfriamiento y se define como la temperatura con la cual la nucleación puede ocurrir (Hartel, 2001).

La nucleación representa el inicio de la cristalización, y ésta se presenta cuando un núcleo de moléculas de agua forman una pequeña partícula sólida dentro del líquido, liberándose calor latente de solidificación. Durante éste proceso el núcleo con radio crítico da origen a la formación de cristales de hielo (Chen, 1987). Es decir, la temperatura del punto de fusión de un cristal está en función de la curvatura de su radio, por ejemplo para una temperatura dada, se tendrá un radio crítico el cual es definido como el tamaño mínimo que el cristal debe tener y permanecer estable; una vez que el núcleo haya alcanzado el tamaño necesario para sobrevivir sin fundirse, éste servirá como un sitio para que los cristales de hielo adyacentes puedan crecer.

Existen dos tipos de nucleación:

- a) *Homogénea*. Ésta se produce en agua pura, libre de todas las impurezas.
- b) *Heterogénea*. Este tipo de nucleación predomina en alimentos dado que se tienen otras sustancias presentes en solución, como proteínas, carbohidratos y cenizas. Dichas partículas actúan como núcleos para iniciar la formación de cristales, por tanto se necesita un menor sub-enfriamiento para obtener un radio mayor al radio crítico; en la mayoría de los casos estas partículas deben tener la misma estructura cristalina similar a la formada por el hielo (Sun, 2006).

El crecimiento de cristales de hielo es considerada como la segunda etapa en la congelación. Una vez que los núcleos de hielo han excedido el radio crítico, los cristales formados comienzan a crecer. Cuando se tienen más de 300 núcleos se puede presentar el crecimiento de los cristales de hielo (Ried, 1983). En el caso de alimentos las sustancias en disolución retardan el crecimiento de cristales de hielo, dado que éste depende de la velocidad de eliminación de calor y del fenómeno de transferencia de masa, donde las moléculas de agua emigran hacia los cristales y terminan agregándose a un germen existente y al mismo tiempo los solutos son rechazados de una región ocupada por cristales de hielo puros. El tamaño de los cristales varía inversamente con el número de núcleos formados.

Por un lado, a mayores velocidades de congelación, se tiene un mayor número de núcleos formados, de esta manera pueden obtenerse cristales de menor tamaño. Por otro lado, a bajas velocidades de congelación se consigue una menor cantidad de núcleos resultando en un aumento en el tamaño de los cristales.

Como ya se ha mencionado, la congelación puede realizarse a través de al menos dos etapas: en la primera es preciso eliminar el calor sensible del alimento para disminuir su temperatura y alcanzar la temperatura de congelación o punto inicial de congelación; durante este proceso no existe un cambio de fase. En la segunda etapa, se elimina el calor latente de congelación, lo que provoca la formación de cristales de hielo, y se tiene un cambio de fase, por lo que la temperatura del alimento se mantiene constante (Tipler & Mosca, 2003).

En la figura 2, se muestra la curva típica de congelación para agua pura que relaciona el tiempo y la temperatura donde:

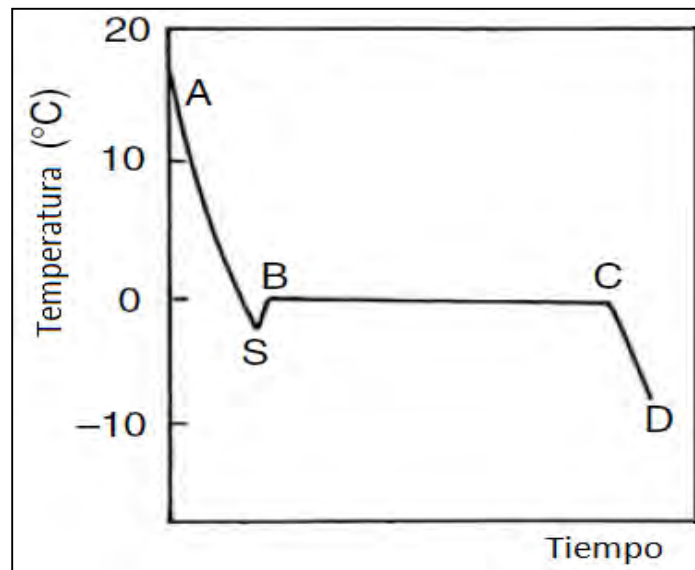


Figura 2. Comportamiento de congelación para agua pura (Sun, 2006).

- ❖ A-S en esta etapa se requiere que se elimine el calor sensible, el agua se enfría por debajo de los 0°C , es decir, se tiene un subenfriamiento sin la formación de cristales de hielo.
- ❖ S-B una vez que se ha retirado el calor sensible, aquí comienzan a formarse los cristales de hielo, también se libera calor latente más rápido que el que se está extrayendo del agua, por tanto se tiene un incremento en la temperatura.
- ❖ B-C cuando se alcanza el punto de congelación del agua (B), los núcleos de hielo son estables y ya no se funden en el seno del líquido, entonces los cristales de hielo comienzan a crecer. Mientras dichos cristales y el agua líquida estén en equilibrio, la temperatura permanece constante hasta que toda el agua se ha convertido en hielo. Esta meseta representa el tiempo durante el cual se lleva a cabo el crecimiento de los cristales o cristalización.
- ❖ C-D al finalizar la cristalización, puede seguirse extrayendo calor sensible, por lo que la temperatura continúa disminuyendo hasta el punto D (Sun, 2006).

Ahora bien, si se efectúa la congelación de un alimento y se registra la temperatura del mismo en su centro térmico, es decir, el punto que más tiempo tarda en congelarse se podría obtener una gráfica como la que se muestra a continuación.

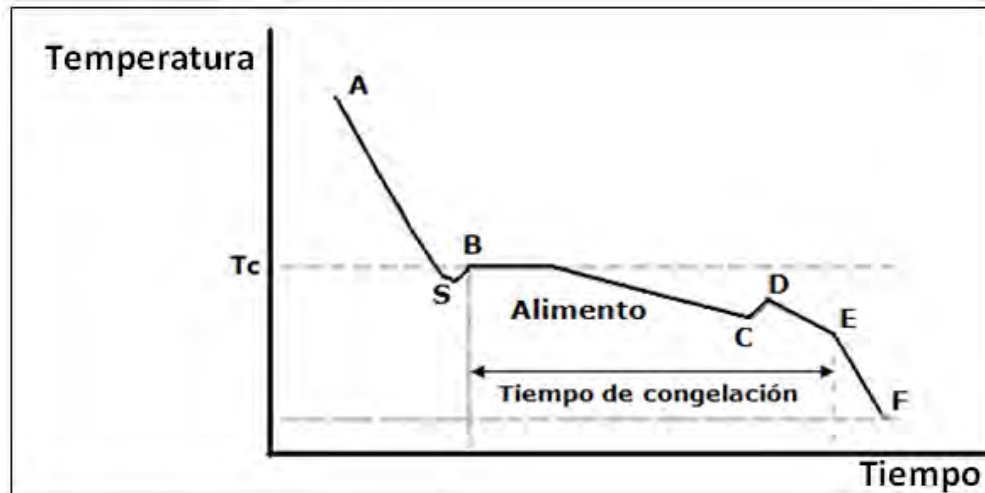


Figura 3. Comportamiento de la congelación para alimentos Fellows (2007).

La congelación de alimentos es más compleja que la congelación de agua pura. Los sistemas alimenticios contienen agua y solutos, por tanto, su conducta es similar a una solución acuosa. Como se puede observar el modelo de congelación de alimentos también posee puntos similares al modelo anterior, la única diferencia entre éste y el del agua es la concentración de los solutos que va del punto B al C. El tejido biológico se comporta de manera similar a una solución diluida, de acuerdo a la Ley de Raoult, el punto inicial de congelación (PIC) disminuye cuando aumenta la concentración de solutos. Por ejemplo, el agua pura se congela aproximadamente a 0 °C, mientras que la mayoría de los alimentos empiezan a temperaturas de -2 °C o incluso menores (Carranza, 2008). En la carne de cerdo la Tc tiene un valor aproximado de -1.5 °C.

- ❖ A-S la congelación se realiza a partir de la temperatura inicial del alimento, en este caso superior a 0 °C, llegando al punto S que representa la temperatura a la cual comienzan a formarse los primeros núcleos de hielo. La temperatura del punto S es menor al PIC, es decir se tiene un subenfriamiento; esta reducción de temperatura es resultado de la energía de activación para que se presente la nucleación (Genot, 2003). Aquí la mayor parte del agua contenida en el alimento se encuentra en estado líquido a

pesar de que se encuentre a una temperatura menor a 0 °C puesto que coexiste en equilibrio con pequeños cristales de hielo. Este subenfriamiento es producido porque la disolución tiene un mayor desorden (entropía termodinámica) que retarda su tendencia a congelar, esto se explica porque durante la transición de fase el cambio de entropía es negativo, es decir, se retira energía calorífica a las moléculas de la disolución las cuales tenían una temperatura mayor a 0 °C, por lo que debe alcanzarse una temperatura menor antes de alcanzar el equilibrio entre el sólido y la disolución (Atkins, 1991).

- ❖ S-B aquí comienza la nucleación y se libera calor de cristalización debido a la formación de cristales hasta que la temperatura alcanza el punto B o PIC.
- ❖ B-C se libera calor latente proveniente de la solución sobresaturada; este comportamiento en la curva generalmente se presenta en algunos alimentos como es el caso de jugos y bebidas, específicamente para soluciones de sacarosa donde se aumenta la concentración de solutos en la fracción de agua no congelada, dicho incremento se debe a que el agua se separa de los solutos y migra hacia los cristales de hielo puros, provocando que los solutos se concentren y de esta manera se obtenga un descenso en el punto de congelación. En esta fase es donde se forma la mayor cantidad de hielo.
- ❖ C-D la cristalización de la solución continúa, la temperatura continúa descendiendo, esto debido a la liberación del calor latente de cristalización que provoca un ligero incremento de la temperatura hasta la temperatura eutéctica de la solución.
- ❖ D-E se elimina calor sensible hasta que la solución llega al punto eutéctico, en donde la fase líquida y la fase sólida se encuentran en equilibrio termodinámico, donde la temperatura de la disolución es la misma para ambas fases, aquí el agua libre se ha cristalizado. En el caso de alimentos es difícil obtener un solo punto eutéctico, debido a que se tienen múltiples sustancias: proteínas, carbohidratos, sales; por tanto se obtienen diferentes puntos eutécticos correspondientes a cada componente (Rahman *et al.*, 2002).
- ❖ E-F la solución se ha solidificado completamente, la temperatura desciende hasta alcanzar la del medio que enfría el alimento, se tiene un sub-enfriamiento donde se libera calor sensible. La proporción de agua no congelada a las temperaturas de congelación comerciales (-18 a -20 °C), depende de la composición del alimento y de

la temperatura de almacenamiento; por ejemplo, para una temperatura de congelación de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ el porcentaje de hielo en carne de cordero es del 88%, en el pescado del 91% y en albúmina de huevo del 93% (Fellows, 2000).

1.2.1 Velocidad de congelación

De acuerdo al Instituto Internacional del Frío (IIF) la velocidad de congelación de un alimento se define como la relación entre la mínima distancia desde la superficie hasta el centro térmico, y el tiempo transcurrido cuando la superficie se encuentra a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el centro térmico alcanza una temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ menor al punto inicial de congelación. Ésta representa la velocidad promedio de formación de hielo o la rapidez del avance del frente frío de congelación en la interfase del producto, la cual está relacionada con la velocidad con la que el calor se retira del producto. Para fines prácticos, el proceso de congelación termina cuando la mayoría del agua congelable (80%) en el centro térmico se ha convertido en hielo (Sun, 2006). El agua dentro de los tejidos biológicos como es el caso de la carne, se encuentra tanto en el interior de las células como en el espacio intercelular; dicha agua es la que forma los cristales de hielo durante la congelación.

La velocidad de congelación tiene gran influencia en el tamaño de los cristales de hielo, generalmente la congelación lenta produce cristales de hielo grandes y contrariamente la congelación rápida da origen a cristales de hielo pequeños (Zaritzky, 2000). En la figura 4 se muestran los dos tipos de congelación.

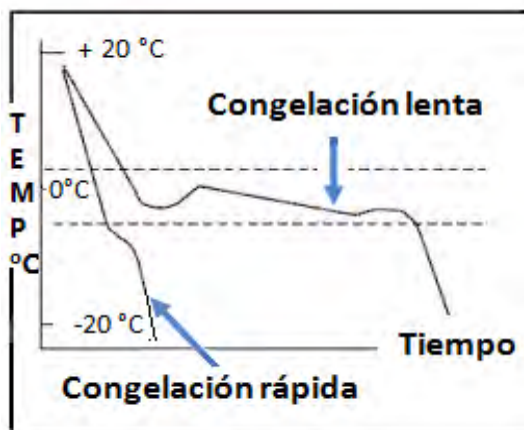


Figura 4. Velocidad de congelación lenta y rápida. Adaptada de Fellows (2000).

La congelación lenta produce cristales extracelulares grandes que dañan la estructura del tejido muscular o las miofibrillas y desnaturalizan las proteínas. Los cristales de hielo crecen en los espacios intracelulares deformando y rompiendo las paredes de las células con las que contactan. La presión de vapor de los cristales de hielo es inferior a la de distintos puntos en el interior de la célula, por lo que el agua pasa de las células a los cristales, tratando de alcanzar el equilibrio termodinámico, engrosándolos y aumentando su tamaño. El incremento de la concentración de solutos que la congelación provoca en algunas zonas, origina daños irreparables a las células por causa de los cristales de hielo grandes (Barreiro, 2006).

Se considera congelación lenta con velocidad inferior a 1 °C/min (Genot, 2003), o si se tienen intervalos de avance de frío en el producto de 0.2–100 cm/h y/o de 0.2-0.5 cm/h, los cuales corresponden a la congelación mediante cámaras frigoríficas, usadas generalmente con fines comerciales en la cadena de suministro. Dichas velocidades pueden conllevar a una menor vida de anaquel del producto y pérdidas de calidad en la carne, principalmente la jugosidad, por la pérdida de agua.

En la congelación rápida los cristales de hielo se forman, tanto en el interior de la célula como en los espacios intracelulares; éstos tienen un tamaño de 1-10 µm, por lo que la estructura de la célula no sufre daños significativos. Tampoco se forma un gradiente de presión de vapor, entre los cristales de hielo extracelulares y el agua en el interior de las células, por lo que la deshidratación celular no se produce; por lo que la textura del alimento no resulta afectada (Genot, 2003).

Para obtener una congelación rápida se recomiendan velocidades de congelación entre 2 y 5 cm/h de avance de frío. Dichas velocidades varían respecto al equipo que se utilice. Mediante congeladores de chorro de aire y por contacto con placas pueden obtenerse de 0.5-3 cm/h, utilizando congeladores IQF (Congelación Rápida Individual por sus siglas en inglés) o de lecho fluidizado se alcanzan de 5-10 cm/h, y por medio de fluidos criogénicos (anhídrido carbónico, nitrógeno líquido), ya sea rociado o por inmersión, ésta se denomina congelación ultrarrápida puesto que se consiguen velocidades de 10-100 cm/h (Sun, 2006).

1.2.2 Congelación criogénica

La congelación criogénica implica el rociado de nitrógeno o el uso de nieve de dióxido de carbono (anhídrido carbónico) en la superficie del alimento o mediante la inmersión del mismo directamente dentro del líquido criogénico. Con este método se obtienen tiempos de congelación más cortos que utilizando la congelación por convección en cámara, esto debido al amplio diferencial de temperatura entre el fluido criogénico y el alimento, así como del resultado de la alta velocidad de transferencia de calor en la superficie que ocurre durante el cambio de fase del elemento criogénico, también conocida como capacidad refrigerante ASHRAE (2002).

Tabla 2. *Propiedades del nitrógeno líquido* (Fellows, 2007).

Propiedades	Nitrógeno líquido
Densidad (kg/m ³)	784
Calor latente (kJ/kg)	358
Capacidad refrigerante total (kJ/kg)	690
Punto de ebullición a 1 atm (°C).	-196
Conductividad térmica (W/mK)	0.29
Consumo/100kg de producto congelado (kg)	100-300

El nitrógeno líquido es usado para lograr una congelación rápida, donde el producto alcanza bajas temperaturas (-70°C). Es particularmente adecuado para una producción a pequeña escala (Evans, 2008). El nitrógeno es un líquido criogénico sin color, ni olor; su temperatura de ebullición es de -195.6° C, dicha temperatura provoca que la congelación sea más rápida en comparación con el anhídrido carbónico (ver tabla 2) y los demás métodos de congelación como convección forzada.

El nitrógeno es inerte, es decir no produce ninguna reacción química cuando hace contacto con alimentos (Madrid, 2003); al llevar a cabo la congelación, el nitrógeno cambia de estado de líquido a gas desplazando al oxígeno del espacio de almacenamiento. De esta manera, el uso de nitrógeno líquido modifica la atmósfera porque disminuye la concentración de oxígeno muy cercana al 0% del espacio de almacenamiento, dicha atmósfera es inerte, deteniéndose así las reacciones de oxidación (Goswami, 2010).

La congelación criogénica no requiere equipo de refrigeración alguno, por lo tanto el costo de capital de dicho sistema de congelación es barato, puesto que sólo se requiere de un tanque para contener el elemento criogénico y de dispositivos como un sistema de rocío.

Sin embargo, el costo del elemento criogénico es alto, lo cual repercute en costos altos de operación, que hacen al método incosteable para grandes cantidades de alimento, por otra parte, el uso del nitrógeno se ha extendido en Inglaterra, Francia y el Reino Unido, en congelación IQF (Congelación Rápida Individual), principalmente para hortalizas como chícharos en congelación a pequeña escala, dado que éstos requieren congelarse rápidamente, donde el costo económico del producto permite su uso (Sun, 2006).

En la congelación criogénica por contacto indirecto mediante el producto se coloca sobre una placa metálica que es congelada mediante nitrógeno líquido que se encuentra en la parte inferior de la misma, el producto no tiene contacto con dicho nitrógeno en estado líquido, sin embargo, se encuentra rodeado por éste en forma de gas. Cabe mencionar que durante este proceso el nitrógeno desplaza el oxígeno del aire, creando una atmósfera inerte.

Cuando el nitrógeno entra en contacto con el alimento como gas, éste aun tiene capacidad de congelación, es decir, absorbe el calor del alimento rápidamente en comparación con los sistemas de compresión mecánica y el anhídrido carbónico, esto se debe a que el nitrógeno líquido se encuentra a una temperatura cercana a su punto de ebullición de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Goswami, 2010).

Las ventajas y desventajas de congelación criogénica por contacto indirecto son: (Goswami, 2010).

Ventajas:

- Bajo costo de funcionamiento, porque requiere menor mano de obra.
- El equipo de congelación ocupa poco espacio.
- El nitrógeno posee un elevado coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), cinco veces mayor que un túnel de congelación (101.52 W/mK).
- Las pérdidas de peso del producto por deshidratación son menores (0.5% en comparación con el 1-8% de los sistemas de convección forzada por chorro de aire), porque se forman cristales pequeños que dañan en menor medida la estructura celular de los alimentos.
- La congelación es más rápida, la cual no afecta en gran medida las características sensoriales y el valor nutritivo de los alimentos.
- Durante la congelación el oxígeno del aire se elimina, generando una atmósfera inerte que detiene los procesos de oxidación que provoca el oxígeno.
- Su puesta en marcha no requiere ningún periodo previo de preparación a diferencia de las instalaciones de congelación; tampoco se requiere energía eléctrica.

Desventajas:

- Sólo se pueden congelar productos planos de poco espesor, los productos que no tienen geometría de placa son difíciles de congelar.
- El producto se adhiere a la superficie de la placa
- Sólo es apta para productos de alto valor económico.

1.2.3 Efectos de almacenamiento congelado

La temperatura de almacenamiento para alimentos congelados debe ser menor a -18°C de acuerdo las regulaciones internacionales como IIF. Además, la temperatura debe ser constante, para no romper la cadena de frío. Cuando la temperatura de almacenamiento fluctúa, la recrystalización se amplifica, porque hay un deshielo seguido siempre en favor de los grandes cristales. Si el producto no tiene un envase, para que no sufra deshidratación o pérdidas de peso, la humedad relativa de la cámara de congelación debe ser por lo menos de 90% (IIF, 1986).

Cuando la carne congelada se mantiene a temperatura constante, los cristales de hielo aumentan progresivamente de tamaño con el tiempo de almacenamiento. Paralelamente, la capacidad de retención de agua de las proteínas y la cantidad de exudado durante la descongelación crece. La desnaturalización de las proteínas y los daños mecánicos producidos en las células son probablemente las causas de esta evolución. El aumento de tamaño de los cristales de hielo, denominado maduración de Ostwald, resulta del hecho de que la energía superficial de los cristales es mucho mayor cuando son de talla pequeña; como el sistema tiene tendencia a evolucionar espontáneamente hacia un estado de mínima energía, dado por el cociente superficie/volumen del cristal, los cristales más grandes doblan su tamaño espontáneamente en detrimento de los pequeños, creciendo hasta alcanzar un diámetro máximo o límite de $61\ \mu\text{m}$ en el caso de carne de vacuno. Este límite se alcanza al cabo de un tiempo que depende de la temperatura de almacenamiento y del tamaño inicial de los cristales y en consecuencia de la velocidad de congelación. A una temperatura de conservación constante, si el diámetro inicial de los cristales es del orden de $30\ \mu\text{m}$, el tamaño límite se alcanza en menos de 25 días a -5°C ; y para un diámetro inicial próximo a los $50\ \mu\text{m}$ el tiempo es de 19 días (Zaritky, 2000). Lo anterior demuestra que aún manteniendo cadena de frío hay crecimiento de cristales.

La recrystalización es el conjunto de cambios físicos que se producen en los cristales de hielo como cambios de forma, tamaño y orientación. Estos cambios, son responsables de gran parte de la pérdida de calidad de los alimentos congelados. En alimentos se producen tres tipos de recrystalización:

- *Isomásica*. Es una transformación de la forma o estructura interna de los cristales que reduce su relación superficie/volumen, es decir los cristales pequeños aumentan de tamaño.
- *Acreativa*. Se produce cuando dos cristales que se hallan en contacto se unen, formando un cristal de mayor tamaño, con lo que el número total de cristales en el alimento se reduce.
- *Migratoria*. Se produce por incremento del tamaño de los cristales más grandes a expensas de los más pequeños. Como consecuencia, el número global de cristales desciende y su tamaño medio aumenta.

La recristalización migratoria es la más importante de las que se producen en los alimentos y es debida a las fluctuaciones de la temperatura del almacenamiento. Cuando el calor penetra en una cámara de congelación, por ejemplo, por la entrada de aire caliente al abrir la puerta, la superficie del alimento más próxima se calienta ligeramente; el calentamiento hace que los cristales de hielo se fundan parcialmente, los cristales grandes se hagan más pequeños y que los pequeños (menores de 10 μm) desaparezcan. La fusión de los cristales aumenta la presión de vapor y hace que el agua migre a zonas con presión de vapor más baja. Todo esto provoca que las partes del alimento más próximas a la fuente de calor se deshidraten. Cuando la temperatura en el alimento desciende de nuevo, la presión de vapor no da lugar a nuevos núcleos, sino que es captada por los cristales de hielo ya existentes que, en consecuencia, aumentan de tamaño. La pérdida de calidad que todo lo anterior provoca es semejante a la que se produce en la congelación lenta (Hartel, 2001).

Cuando la conservación de canales de res y de cerdo se lleva a cabo en cámaras de congelación sin envase, por lo tanto, ésta pierde agua porque la escarcha situada en la parte externa del producto se sublima, debido a que la presión de vapor del aire es menor a la de la escarcha (Campañone *et al.* 2001). La pérdida de agua por sublimación durante el almacenamiento representa generalmente entre un 0.5 y un 1.2% de la masa del producto, aunque pueden alcanzar un 5%. Esta depende, principalmente de las condiciones de almacenamiento como la velocidad del aire, la temperatura y del sistema de compresión mecánica.

La pérdida se debe a que la presión parcial de vapor de agua en el aire, es inferior a la del producto. Esta pérdida es un problema importante, porque representa una pérdida de peso del producto y en consecuencia una pérdida económica (Méndez, 1999). Por lo anterior, varios autores han investigado la influencia de los factores que afectan que la pérdida de peso en alimentos.

- *Temperatura de almacenamiento.* Campañone *et al.* (2001) reportaron pérdidas de agua de 1.2% a una temperatura de -30 °C y 5.5% a -9 °C en pierna de cerdo. La pérdida de peso fue mucho menor a bajas temperaturas, debido a que la presión parcial del vapor de agua en la superficie del producto disminuye de manera directamente proporcional con la temperatura (Genot, 2003). Delgado y Sun (2007) desarrollaron un modelo para predecir la pérdida de peso, congelaron las muestras para alcanzar temperaturas de -29.7 y -12.4 °C obteniendo pérdidas de peso correspondientes de 1.74 y 3.25%, es decir, concluyeron que al congelar las muestras a una mayor velocidad y alcanzándose una menor temperatura las pérdidas de peso se redujeron.
- *Variaciones de temperatura.* Laguerre y Flick (2007) utilizaron dos congeladores domésticos, el primero con un solo compresor y el segundo con dos; al compararlos, se encontraron mayores pérdidas de peso en el primer congelador (0.4%) más que el segundo, esto fue porque al tener un solo compresor se tuvieron mayores fluctuaciones de temperatura que favorecieron la pérdida de peso, correspondientes a los ciclos de “paro y arranque” del compresor.
- *Tiempo de almacenamiento.* Poovarodom *et al.* (1990) comprobaron que la pérdida de peso se incrementó rápidamente con el tiempo de almacenamiento (6% para un periodo de 9 meses de almacenamiento a -20 °C). Después, el peso se vuelve estable debido a la deshidratación en la superficie del producto, la cual es una barrera a la sublimación del agua.

- *Aislamiento del envase.* Laguerre y Flick (2007) utilizaron esferas de melón y papa, envasadas en cajas con diferentes espesores de aislamiento; ellos encontraron para el melón envasado una pérdida de peso de 5% después de 3 meses de almacenamiento a -18 °C, las pérdidas disminuyeron significativamente al aumentar el espesor de aislamiento del envase. Méndez (1999) también encontró que el uso de un envase de cartón reduce considerablemente las pérdidas de agua (más de un 50%) en carne de res; sin embargo, para la carne porcina fue menos importante, debido a que dicha carne tiene una cobertura natural de grasa.
- *Velocidad del aire dentro de cámara o túnel.* Campañone, *et al.* (2001) congelaron muestras de geles de tilosa, papa y carne, obteniéndose mayores pérdidas de peso cuando la velocidad del aire fue mayor (1.6% a 2.5m/s y 0.75% con 0.5 m/s respectivamente). Esto se debe al hecho de que una mayor velocidad del aire aumenta el coeficiente convectivo en la superficie del producto, propiciando la pérdida de agua. Por otra parte, Gigiél y Creed (1987) encontraron que la velocidad del aire no tiene efecto significativo en la pérdida de peso (2.48%) en carne de cabra en un intervalo de 0.5 a 3 m/s. Probablemente esto se explica porque la carne de cabra tiene mayor contenido de grasa en su composición química que la de carne de res, 7.9% y 0.65% respectivamente (Astiasarán y Martínez, 2000), actuando como una barrera a la sublimación del agua, tal como los resultados anteriores encontrados por Méndez (1999) en la carne cerdo. Además hay otros factores que también afectan la pérdida de agua, como la masa de producto y la superficie expuesta al aire dentro de la cámara (Genot, 2003).

La pérdida de peso adquiere importancia porque generalmente provoca una deshidratación superficial también llamada “quemadura por frío” en alimentos como: pan, hortalizas, productos de la pesca y principalmente carne; dicha deshidratación visible para el consumidor, la cual induce modificaciones en el color, textura y provoca rancidez en la superficie del alimento, debido a que se favorecen las reacciones de oxidación de lípidos que causan un impacto negativo en el sabor (Schmidt y Lee, 2009), dando como resultado una degradación en la calidad (Martins *et al.*, 2005).

Como ejemplo, en la figura 5 se tienen dos pechugas de pollo, en la figura 5 A) la pechuga está fresca mientras que en la 5 B) es evidente el cambio de color de rojo a blanco, causado por la quemadura por frío; además se presenta un endurecimiento en la superficie debido a que ésta se encuentra deshidratada (Schmidt y Lee, 2009).



Figura 5. Comparación de carne fresca y deshidratada (Schmidt y Lee, 2009).

1.3 Psicrometría del aire

Psicrometría del aire se define como la medición del contenido de humedad del aire, es decir es la ciencia que controla las propiedades termodinámicas del aire húmedo y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano como el aire acondicionado (Emerson, 2009).

Algunas definiciones importantes son:

a) *Temperatura de bulbo seco* es la temperatura del aire medida con un termómetro de mercurio, pero éste debe protegerse de la humedad del aire y de la radiación solar.

b) *Humedad relativa (H.R.)* es 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 porcentaje, tal como 50%, 75% o 30%. También se define como la fracción mol del vapor de agua presente en el aire, con la fracción mol del vapor de agua presente en el aire saturado, a la misma temperatura y presión.

c) *Humedad absoluta* de una mezcla aire-vapor de agua, se define como los kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Esta definición de la humedad sólo depende de la presión parcial del vapor de agua en el aire y de la presión total del sistema (Geankoplis, 1998).

d) *Temperatura de rocío*. Si una mezcla de vapor de agua-aire se enfría a presión constante, *la temperatura o punto de rocío* es la temperatura donde el vapor de agua presente en el aire comienza a condensarse, porque el aire está saturado al 100% de humedad relativa (Geankoplis, 1998), es decir, ya no puede retener el agua en forma de vapor (Emerson, 2009). Un ejemplo acerca del punto de rocío es cuando el vapor de agua se condensa, formándose pequeñas gotas de agua sobre la superficie fría de un cristal de una ventana como se muestra en la figura 6.

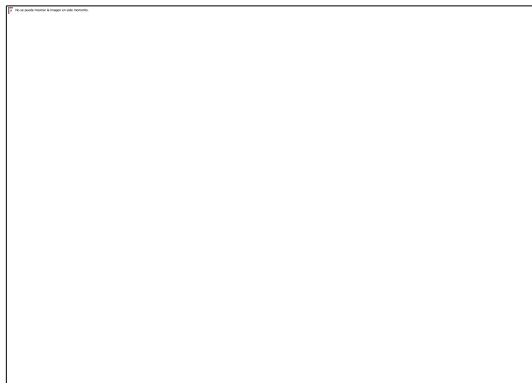


Figura 6. Fenómeno habitual del punto de rocío (Hermet, 2011).

e) *Presión de vapor*. Cuando un líquido como agua se introduce en un recipiente cerrado, las moléculas de dicho líquido se evaporan en el espacio por encima de éste y lo llenan por completo. Después de un tiempo se llega al equilibrio, este vapor ejerce una presión al igual que un gas. La presión de vapor de un líquido aumenta notablemente al elevarse la temperatura. Por ejemplo, la presión de vapor del agua a 50 °C es 12.333 kPa, mientras que a 100 °C la presión de vapor aumenta a un valor de 101.325 kPa (Himmelblau, 2002). Por ejemplo, si un balde de agua se mantiene a 65.6 °C en una habitación a 101.3 kPa de presión absoluta, la presión de vapor del agua será de 25.7 kPa. Esto ilustra una propiedad muy importante de la presión de vapor del agua, en cuanto a que no la afecta la presencia de un gas inerte como el aire, esto es, la presión de vapor del agua es esencialmente independiente de la presión total del sistema (Geankoplis, 1998).

f) *Aire sobresaturado*, es un término comúnmente usado en la comunidad de la refrigeración industrial para referirse a una mezcla en equilibrio de aire y vapor de agua, cuando este último está presente en cantidades superiores y más allá de la saturación en donde predomina la temperatura de bulbo húmedo; el aire sobresaturado existe en muchas situaciones de nuestra vida diaria, un ejemplo típico es la niebla que se encuentra en ambientes húmedos y con baja temperatura (Mago y Sherif 2005).

g) *Temperatura de bulbo húmedo*, se mide mediante un termómetro con su bulbo envuelto por una mecha de algodón, cuya parte inferior se encuentra sumergida en un recipiente con agua. Con ayuda de un ventilador el termómetro se expone a un flujo constante de aire de aproximadamente 3 m/s, lo cual provoca que el agua ascienda por capilaridad a lo largo de la mecha y se evapore. El proceso de evaporación libera calor, lo cual enfría el bulbo. La temperatura del bulbo desciende hasta que el aire que lo rodea se satura por completo, entonces el termómetro registra un valor que representa la temperatura de bulbo húmedo.

Una carta de humedad o psicrométrica, una gráfica que relaciona las propiedades del aire, tales como temperatura, humedad relativa y volumen. En el Anexo 1 se muestra una carta de humedad. Las cartas psicrométricas se utilizan para determinar cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire por procesos de humidificación, deshumidificación, aumento o descenso de la temperatura. En la figura 7, se muestra un esquema de la carta psicrométrica en donde se muestran la ubicación de las diferentes temperaturas: T_r = temperatura de rocío, T_w = temperatura de bulbo húmedo y T_{bs} = temperatura de bulbo seco.

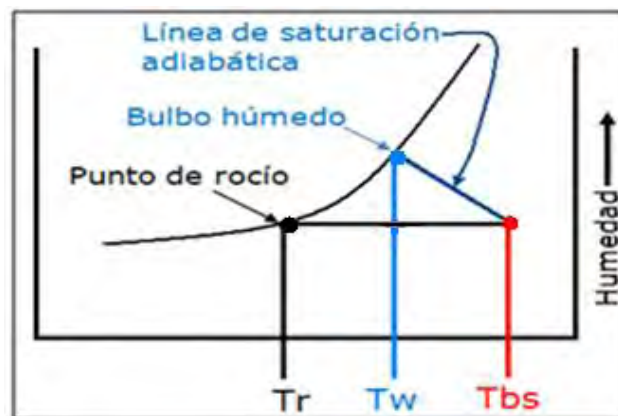


Figura 7. Disposición general de la carta psicrométrica. Adaptada de Himmelblau (2002).

Si se tiene un sistema con una mezcla de aire y vapor de agua a una temperatura de bulbo seco de 37.8 °C, (puesto que se trata de la temperatura que indica un termómetro) representada por el punto rojo de la figura 7, si dicha mezcla se pone en contacto con un el rocío de agua líquida y ésta se recircula, entonces la temperatura y la humedad de la mezcla de salida serán distintas; en este caso la temperatura de la mezcla disminuye y la humedad aumenta, hasta llegar a la saturación alcanzando la temperatura de bulbo húmedo o saturación adiabática (punto azul). Este proceso se muestra en la línea azul marino, si el contacto con el agua de rocío no es suficiente, la mezcla de salida tendrá un porcentaje de saturación inferior al 100% pero en la misma línea.

Al seguir enfriando la mezcla, parte del vapor de agua se condensaría, llegando hasta el punto de rocío (punto negro de figura7), puesto que la presión parcial tendría el mismo valor que la presión de vapor de saturación (García, 2007). Ahora bien, partiendo de la temperatura de bulbo seco de 40 °C, si se tiene una mezcla aire-vapor de agua almacenada en un sistema cerrado, y se disminuye la temperatura del sistema a 20 °C, tal como dentro de una cámara de refrigeración, se dice que el aire se humidifica de manera indirecta, esto se muestra en la figura 8. Al disminuir la temperatura del aire, se disminuye la presión de saturación, o la cantidad máxima de agua admisible en el aire, es decir, el aire se va saturando de vapor de agua aumentándose así la humedad relativa, hasta llegar al punto de rocío, tal como se explicó anteriormente.

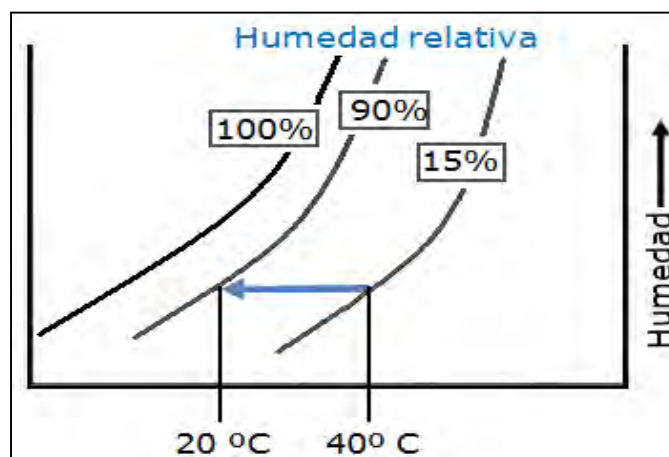


Figura 8. Humidificación indirecta del aire. Adaptada de Himmelblau (2002).

1.4 Formación de escarcha de hielo

La formación de escarcha ha adquirido importancia cuando se lleva a cabo la congelación, debido a que se encontró que este fenómeno puede provocar una disminución en la transferencia de calor del 50 al 75% (Emery y Siegel, 1990). La escarcha está compuesta por hielo poroso lleno de aire, con una conductividad térmica muy baja, que actúa como un aislante reduciendo la transferencia de calor (Kim *et al.*, 2009).

Un mayor espesor de escarcha porosa representa una resistencia térmica que aumentará el tiempo de congelación y el costo de la operación. Actualmente, resulta de gran interés reducir los consumos de energía utilizados en las cámaras de congelación de alimentos (Gatica y Pita, 2008) y disminuir los tiempos de congelación. La formación de escarcha se ha estudiado principalmente en placas metálicas de cobre (Cheng y Shiu, 2002).

La escarcha es un problema muy común en la industria de congelación de alimentos, este fenómeno se presenta constantemente en las cámaras de congelación durante el almacenamiento de carne, frutas y verduras, donde el aire húmedo se va hacia los serpentines de los evaporadores y se solidifica en forma de escarcha de hielo (Genot, 2003), la cual reduce la transferencia de calor y por tanto, la eficiencia de dichos equipos en un intervalo del 50 al 75% (Emery y Siegel, 1990), provocando así una pérdida de carga del aire, es decir, una caída de presión en el aire que circula en el área de paso localizada alrededor de los evaporadores, en virtud de que la escarcha representa una barrera, disminuyendo de esta manera la capacidad de refrigeración (Gatica *et al.*, 2009).

La formación de escarcha se debe principalmente a las variaciones de temperatura y de humedad relativa que se presentan en las cámaras de congelación industriales, los congeladores domésticos y, también sobre la superficie de los alimentos con y sin envase; dichas variaciones son inducidas por “la apertura y cierre de puerta de la cámara” (Fellows, 2000). Sin embargo, manteniendo la puerta cerrada éstas son provocadas por los “ciclos de paro y arranque” del compresor (Laguerre y Flick, 2007) y los ciclos de deshielo en los congeladores (Schmidt y Lee, 2009).

Se han realizado numerosos estudios para investigar el mecanismo y los efectos de la formación de escarcha en equipos de congelación y en placas metálicas. Sin embargo, para el caso de alimentos la literatura es incipiente. Se ha analizado que la escarcha modifica características de calidad visibles para el consumidor en alimentos como es el caso del color (Martins *et al.*, 2004). En este caso, se investigó la formación de escarcha durante la descongelación de alimentos en aire caliente, debido a que la conductividad y difusividad térmica de la escarcha son inferiores a las del hielo, actuando como una resistencia a la transferencia de calor (Fellows, 2000).

Finalmente, el espesor de escarcha es una variable importante, en virtud de que indica la cantidad formada sobre la superficie. Además, es importante poner en evidencia que la carne, representa una superficie hidrofílica que es afín con el agua, de modo que la escarcha puede formarse más fácilmente sobre ésta.

1.4.1 Mecanismo de formación de escarcha

Dentro de una cámara de congelación se tienen aire con una temperatura de rocío y superficies frías. Mientras la temperatura de una determinada superficie fría sea mayor que la temperatura de rocío del aire, el vapor de agua no se condensará; esto se muestra en la figura 9 A). Sin embargo, cuando la temperatura de la superficie fría es igual o menor que la del punto de rocío del aire pero mayor a 0 °C, en consecuencia el vapor de agua condensará sobre la superficie fría (figura 10 B). Por otro lado, si la temperatura de la superficie fría es menor al punto de congelación del agua (0 °C), entonces el vapor condensado se congela se formándose cristales de hielo sobre dicha superficie (Cheng y Shiu, 2002).

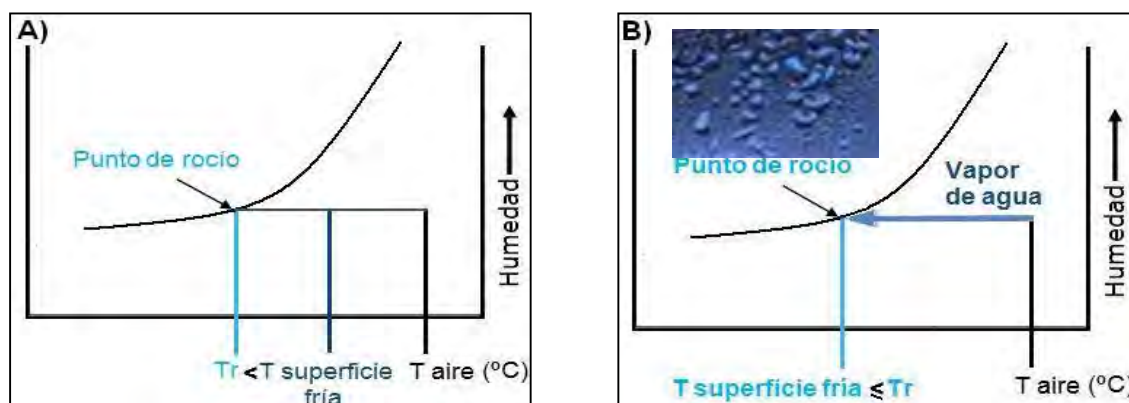


Figura 9. Condensación del vapor de agua. Adaptada de Himmelblau (2002).

En la figura 10 puede observarse el sub-enfriamiento del vapor de agua condensado representado por el punto (B) partiendo del punto de rocío (A'). Finalmente cuando ambas, la temperatura de la superficie y la temperatura de rocío son menores a 0 °C, la sublimación inversa del vapor de agua puede ocurrir, es decir el vapor de agua en el punto A puede cambiar de fase directamente a sólido (C), sin pasar por el estado líquido. Para que esto ocurra debe existir una diferencia de temperaturas entre la superficie fría y el punto de rocío, también llamado grado de sub-enfriamiento (ΔT_{sub}), antes de que ocurra el cambio de fase (Hermes *et al.*, 2009).

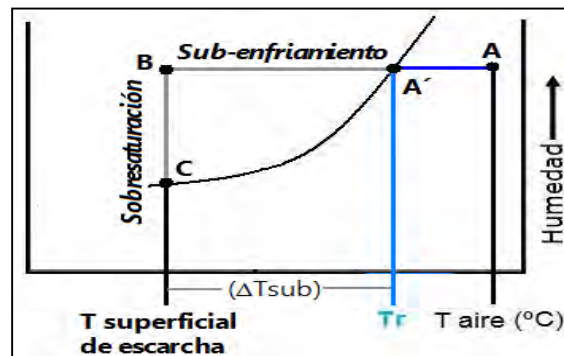


Figura 10. Representación psicrométrica de la formación de escarcha (Hermes *et al.*, 2009).

Por otro lado, el aire en estado sobresaturado o niebla, se forma en las cámaras de congelación a causa de la mezcla de aire caliente y húmedo (que se encuentra en el exterior) con el aire seco y frío que se encuentra en el interior de la cámara debido a la apertura y cierre de puerta. La probabilidad de formación del aire sobresaturado, está en función de la temperatura y de las diferencias de humedad dentro y fuera del recinto mencionado. Esto se muestra gráficamente en la figura 11; la temperatura y la humedad de la mezcla dependen de la cantidad de aire de cada una de las corrientes, para determinarla se realiza un balance de materia o humedad.

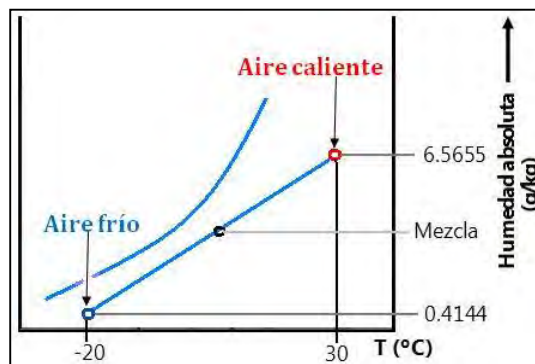


Figura 11. Mezcla de aire frío y caliente. Adaptada de Himmelblau (2002).

Cuando existe un aire sobresaturado donde su temperatura está por encima del punto de congelación del agua, el vapor de agua en el aire se transforma en pequeñas gotas de líquido suspendidas en la corriente del aire, es decir niebla. No obstante, cuando la temperatura del aire está por debajo del punto de congelación, el agua cambia de estado y se forma una “niebla de hielo”. Esta niebla de cristales que son transportados por el aire, tienen gran afinidad por las superficies frías y como consecuencia tienden a depositarse en alguna superficie durante su trayecto hacia el interior de la cámara, a esto se le conoce como formación de escarcha en condiciones de sobresaturación (Mago y Sherif 2005).

1.4.2 Etapas de formación-fusión de escarcha por ablimentación

Existen dos mecanismos de formación de escarcha el primero es por condensación, que se explicó anteriormente y el segundo es por ablimentación o paso del vapor de agua presente en el aire a sólido. La formación-fusión de escarcha en un alimento se presenta generalmente por el segundo mecanismo y consta de seis etapas que se explicarán a continuación (Manapperuma y Sigh, 1987).

Etapa 1) Formación de escarcha de hielo

Cuando un alimento congelado está expuesto a un ambiente donde el aire está caliente y húmedo, una capa de escarcha comienza a crecer sobre la superficie del alimento casi instantáneamente. Aquí se presenta una transferencia simultánea de calor y de masa del aire hacia la superficie del alimento. El vapor de agua presente en el aire alcanza la superficie del alimento, sometiéndose a una nucleación heterogénea en forma de cristales de hielo que se depositan en la superficie.

Cuando el aire sobresaturado dentro de una cámara de congelación se encuentra a una temperatura superior al punto de congelación del agua, la humedad en el aire probablemente se encuentra en forma de pequeñas gotas de agua suspendidas en la corriente del aire, que a simple vista se conoce como niebla. Cuando la temperatura del aire está por debajo del punto de congelación del agua, probablemente se forma una “niebla de hielo” (Mago y Sherif, 2005). A este cambio de estado de vapor de agua a hielo sin pasar por el líquido se le conoce como sublimación inversa o ablimentación (Gatica *et al.*, 2009).

En la figura 12 se muestra el perfil de temperaturas durante fase de la formación de escarcha, $T_{sup a}$ indica la temperatura superficial del alimento. De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, la transferencia de calor generalmente se genera por un gradiente de temperatura, es decir, el sentido del flujo de calor va de una temperatura mayor a una temperatura menor, siempre y cuando haya un aumento en la entropía. La transferencia de masa también sigue este comportamiento, la diferencia de presiones es la que crea una fuerza impulsora que explica porque el vapor de agua migra hacia la superficie fría.

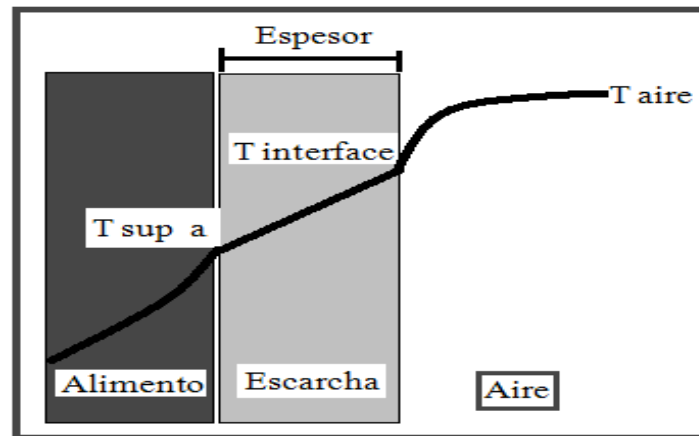


Figura 12. Perfil de temperaturas (Mannapperuma y Singh, 1987).

Mientras mayor cantidad de vapor de agua alcance la superficie del alimento, existe mayor nucleación y crecimiento de cristales esta capa de escarcha continua creciendo mientras la temperatura de la interfaz escarcha-aire se encuentre por debajo del punto de congelación del agua.

Etapa 2) Consolidación de escarcha

La etapa de crecimiento de la escarcha termina cuando la temperatura de la interfase escarcha-aire se incrementa por encima del punto de congelación del agua. El vapor de agua que alcanza la superficie de los cristales de hielo no puede solidificarse en la misma. Por tanto, una parte del vapor condensa en la superficie de los cristales de hielo, formando gotas pequeñas de agua sobre la interfase. El agua condensada y la parte del vapor de agua restante migran dentro de la superficie de la escarcha. Una vez que han alcanzado el interior de la capa de escarcha, el vapor de agua solidifica en la superficie de los cristales de hielo ya existentes dentro de la capa de escarcha donde la temperatura esta aún por debajo del punto de congelación del agua. Este

proceso gradualmente incrementa la densidad de la escarcha, hasta que todos los poros de la misma están llenos y se forma una capa de hielo.

La escarcha al ser un medio poroso tiene una baja densidad (650 kg/m^3) en comparación con el agua (1000 kg/m^3), por tanto, este proceso de consolidación termina hasta que la densidad de la escarcha alcanza la densidad del hielo. La estructura porosa y cristalina de la escarcha dificulta el análisis teórico, la transferencia de calor y masa dentro de la capa de escarcha durante esta fase es una combinación de fenómenos simultáneos de difusión y sublimación inversa del vapor de agua, solidificación de agua líquida, conducción y convección de calor.

Etapa 3) Transición de fase

Una vez que la fase de consolidación de escarcha se ha completado, la superficie del alimento está completamente cubierta por una capa delgada de hielo. La interfase entre esta capa de hielo y el aire está en la temperatura del punto de congelación del agua, mientras la superficie de alimento se encuentra a una temperatura ligeramente más baja. Continuando la transferencia de calor y masa del aire hacia la capa de hielo, todo el vapor de agua alcanza la interfase hielo-aire condensando como agua y comienza a formar una capa delgada de agua. Así, estas dos capas se presentan en la superficie del alimento. La interfase hielo-agua permanece a la temperatura de punto de congelación del agua, mientras que la interfase agua-aire se encuentra a una temperatura ligeramente más alta. La figura 13 ilustra el perfil típico de temperaturas durante esta fase, donde $T_{sup a}$ indica la temperatura superficial del alimento, T_F representa el punto de congelación del agua y T_s la temperatura de la interfase agua-aire.

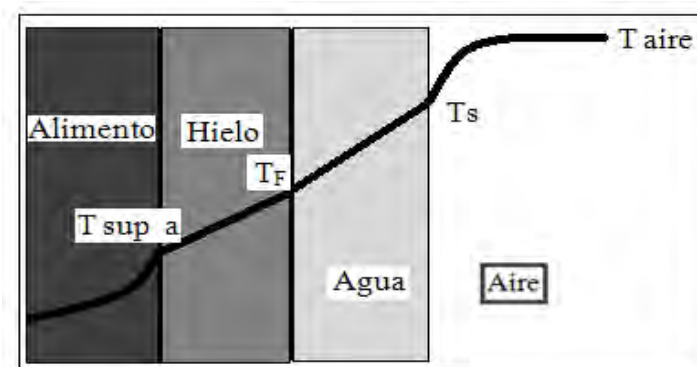


Figura 13. Perfil de temperaturas durante transición de fase (Mannapperuma y Singh, 1987).

La condensación del vapor de agua libera su calor latente en la interfase de agua-aire. Estos calores, latente y el calor recibido en la interfase por convección, han sido transferidos a través de las dos capas de escarcha hacia la superficie del alimento, donde este es un proceso no-estático, parte de este calor es utilizado en la interfase para derretir el hielo, resultando en la disminución gradual de la capa de hielo, hasta que éste se derrite por completo marcando el fin de esta etapa.

Etapa 4) Condensación

Cuando la capa de hielo se ha derretido por completo, solamente una capa delgada de agua está presente en la superficie del alimento. La transferencia de masa y calor del ambiente hacia la capa de agua continúa, por lo tanto la condensación del vapor de agua sobre la capa existente de agua también continúa. La temperatura de la interfaz agua-aire gradualmente se incrementa hasta alcanzar el punto de rocío del aire del ambiente. En esta etapa, el potencial de transferencia de masa o fuerza impulsora desaparece y la transferencia de masa se detiene, de esta manera termina la fase de condensación.

Etapa 5) Evaporación

Cuando la interfase agua-aire alcanza la temperatura del punto de rocío, la transferencia de masa se detiene momentáneamente, pero la transferencia de calor prevalece. Por lo tanto, la temperatura de la interfase se incrementa por encima de la temperatura del punto de rocío y su presión de vapor se incrementa superando la del ambiente. Esto crea un potencial de transferencia de masa en dirección opuesta, causando que el agua de la capa de agua de la interfase del alimento se evapore hacia al ambiente. Esta etapa de evaporación termina cuando dicha capa de agua se ha evaporado completamente.

Etapa 6) Secado

Una vez que la capa de agua en la superficie se ha evaporado completamente, la superficie del producto está en contacto con el aire, entonces el agua del alimento migra hacia el aire y el alimento se deshidrata, comenzando la etapa de secado. Esto se debe a que en la superficie del alimento la presión de vapor del agua es mayor que en el aire, de este modo el agua migra para llegar al equilibrio (Laguerre y Flick, 2007). Este proceso de secado está definido por las características del alimento y no por el fenómeno de superficie.

1.4.3 Influencia de las variables en la formación de escarcha

La formación de escarcha ha sido estudiada por varios autores, que analizaron el efecto de variables tales como: la velocidad del aire, la humedad relativa y temperatura de la placa; dónde proponen un modelo de comportamiento que predice el crecimiento de la escarcha de hielo.

- *Temperatura de la superficie fría.* Manteniendo constante la temperatura del aire (16° C), que fluía hacia la placa fría Hermes *et al.*, (2009) encontraron un mayor espesor de escarcha cuando la temperatura de la superficie fría fue menor; en 120 minutos de experimentación el espesor aumentó de 1.7 mm a 3.7 mm cuando la temperatura fue de -4 y -16 °C respectivamente. El crecimiento fue debido al aumento en el grado de sub-enfriamiento, es decir hizo más grande la diferencia de temperatura entre el aire y la placa fría, que resulta en un mayor flujo de masa. También Mago y Sherif, (2005) llegaron al mismo resultado, siendo el espesor de escarcha mayor cuando el aire se encuentra sobresaturado. Así mismo Hermes *et al.*, (2009) al disminuir la temperatura de la placa fría, obtuvieron una menor densidad de escarcha, (cuando la temperatura de la placa fue -4 °C la densidad de la escarcha fue 200 kg/m³, mientras que a -16 °C la densidad fue de 160 kg/m³); esto se explica porque un mayor sub-enfriamiento induce el crecimiento rápido y no-uniforme de los cristales de hielo, por lo tanto la porosidad de la escarcha es mayor.
- *Humedad relativa.* Cheng y Shiu, (2002) concluyeron que a una mayor humedad relativa (42, 48 y 59%) se obtuvo un mayor espesor, y una mayor densidad de escarcha, tal como se puede ver en la figura 14.

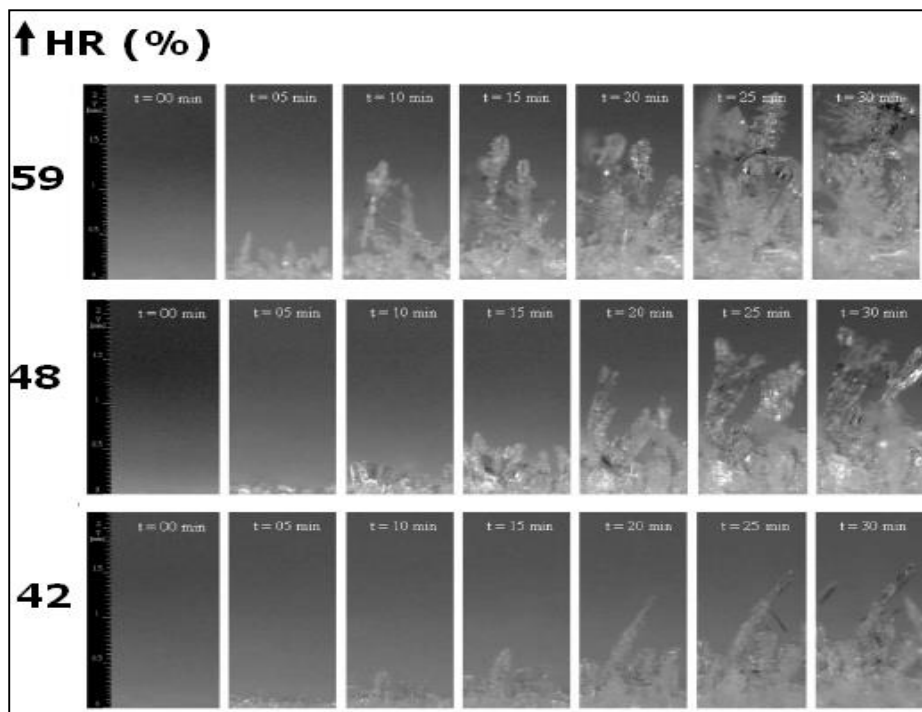


Figura 14. Efecto de humedad relativa en escarcha (Cheng y Shiu, 2002).

- *Humedad absoluta.* Lee y Ro, (2005) determinaron que al aumentar la humedad absoluta del aire el espesor de la escarcha aumenta, de igual manera que al aumentar la humedad relativa; no obstante, la densidad de la escarcha disminuye.
- *Velocidad del aire.* Mago y Sherif, (2005) encontraron que el espesor de la escarcha aumentó ligeramente (0.1-0.2 mm) al incrementar la velocidad del aire (de 2 a 4 m/s), ya que eleva el coeficiente convectivo y también el coeficiente de transferencia de masa, causando que la escarcha que se depositó en la placa fría se llevará a cabo con mayor rapidez. Por otra parte, un aumento en la velocidad del aire también incrementó la temperatura de la interfase escarcha-aire, la cual provocó un decremento de la fuerza impulsora entre el aire y la escarcha, lo que se traduce en una disminución en la diferencia de humedades así como en la velocidad de deposición de escarcha. Evidentemente, el efecto formador de escarcha es más dominante que éste último efecto, resultando en una mayor cantidad neta de escarcha depositada, es decir un mayor espesor de escarcha. Cheng y Shiu, (2002) encontraron que a mayor velocidad del aire (con intervalos de 0, 1 y 3 m/s) se formaron mayor cantidad de cristales de

escarcha, de esta manera se aumentó el espesor, y la densidad se incrementó con el tiempo. Sin embargo, cuando la velocidad fue 0 m/s, el crecimiento de la escarcha no es uniforme como se puede ver en la figura 15; los cristales crecen de manera aislada y tienen forma similar a un bosque con diferentes tipos de árboles.

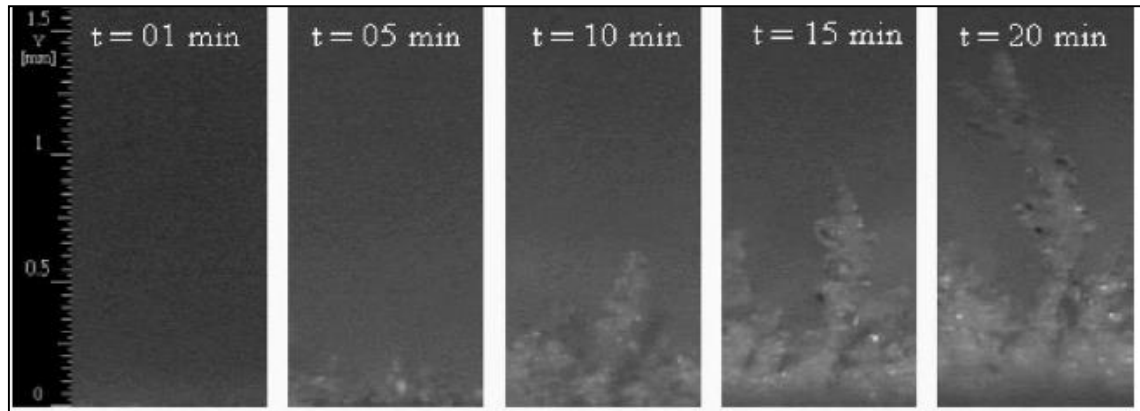


Figura 15. Formación de cristales de escarcha (Cheng y Shiu, 2002).

- Lee y Ro, (2005) estudiaron el efecto del número de Reynolds, cuando éste se redujo de 2000 a 1000, en consecuencia se disminuyó el espesor (0.3 mm) y también la densidad de la escarcha (de 180 a 153 kg/m³).
- *Temperatura de bulbo seco.* Lee y Ro, (2005) encontraron que a una mayor temperatura del aire (10 y 20 °C) se obtuvo un menor espesor (3.4 y 2.7 mm) y una mayor densidad de la escarcha 150 y 200 kg/m³ respectivamente.
- *Temperatura de la placa.* Cheng y Shiu, (2002) trabajaron con placas metálicas huecas por donde circula un refrigerante; utilizaron dos distintas temperaturas del refrigerante (-14.8 °C y -16 °C) para modificar la de las placas. Las fotografías mostraron distintas estructuras de escarcha, que puede observarse en la figura 16. Para hacer un modelo matemático de predicción de formación de escarcha, éstos cristales no pueden ser considerados como simples columnas circulares, puesto que pueden formarse de manera impredecible.

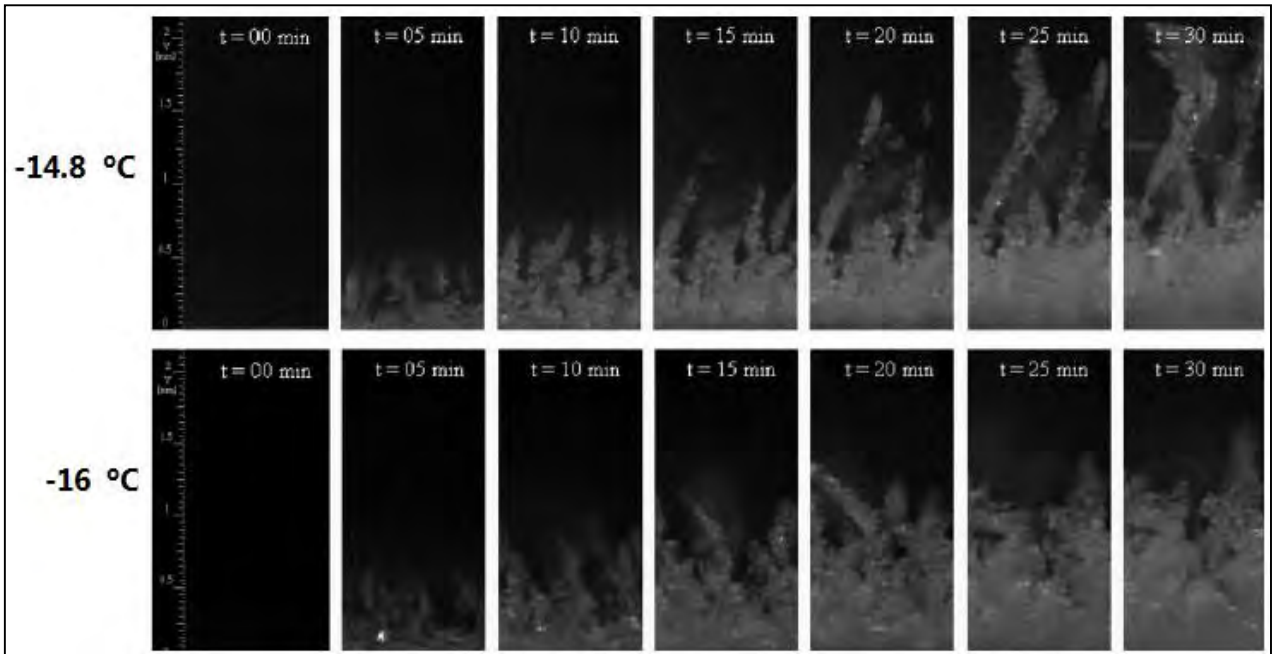


Figura 16. Efecto de la temperatura del refrigerante en escarcha (Cheng y Shiu, 2002).

1.4.4 Estructura del cristal de hielo

Se pueden identificar dos clasificaciones generales para los cristales de hielo, en sus formas más simples estas son: columnas y placas. Ambos tipos de cristales pueden exhibir estructuras esqueléticas o incompletas. Las columnas con caras incompletas son llamadas columnas huecas, fundas o en caso extremo agujas (huecas como las usadas en las jeringas).

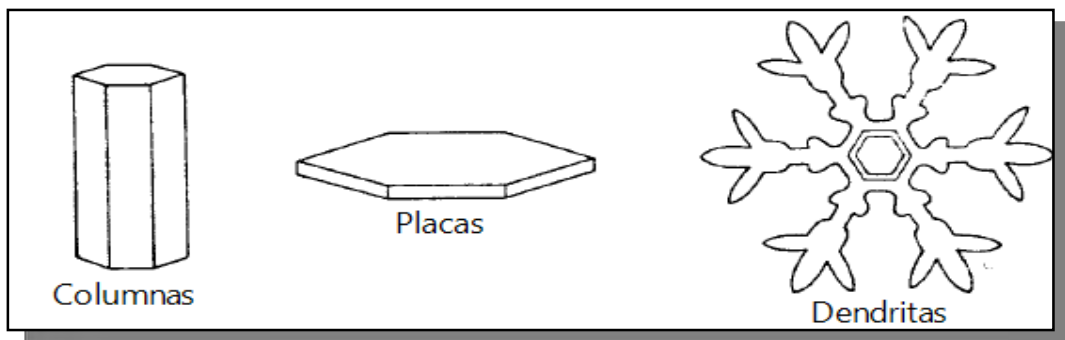


Figura 17. Principales estructuras de cristales de hielo (Sahin, 2000).

Las placas que forman extensiones semejantes a placas de las caras de un prisma son llamadas dendritas las cuales se muestran en la figura 17 (Sahin, 2000).

Algunos investigadores han notado que la forma de los cristales de hielo exhibe una fuerte dependencia de la temperatura y en menor grado de la sobresaturación. Mason *et al.* (1971) fueron capaces de hacer crecer cristales en un intervalo de temperaturas de 0 a -50 °C y en condiciones de sobresaturación cerca de 300%, usando una delgada fibra de vidrio o *nylon* corriendo verticalmente a través del centro de una cámara de difusión de vapor de agua (Sahin, 2000). La forma del cristal varió a lo largo de la longitud de la fibra como se muestra en la tabla 3. La característica más notable de la forma de cristal es la singular secuencia del cambio de forma, placas-prismas-placas (y estrellas o dendritas) –prismas, la cual ocurre cuando la temperatura disminuye de 0 a -25 °C. Por un lado, grandes variaciones en el grado de sobresaturación no cambian la forma básica del cristal entre el crecimiento de prisma y placa, aunque naturalmente las velocidades de crecimiento de los cristales son afectadas.

Tabla 3. *Variación de la forma del cristal con la temperatura.*

Intervalo de temperatura (°C)	Forma de cristal de hielo
0 a -3	Placas delgadas hexagonales
-3 a -5	Agujas
-5 a -8	Prismas hueco
-8 a -12	Placas hexagonales
-12 a -16	Cristales dendríticos
-16 a -25	Placas
-25 a -50	Prismas huecos

(Sahin, 2000).

Por otro lado, la sobresaturación parece gobernar el desarrollo de las características de los cristales como extensiones en forma de agujas en los prismas huecos, el crecimiento de puntas o “espinas” en las esquinas de las placas hexagonales, y los “helechos” se desarrollan en los cristales con forma de estrella; todos estos cambios ocurren solamente si el grado de saturación excede los valores correspondientes a los de la saturación relativa del agua líquida, es decir 100% (Sahin, 2000).

Por otra parte, Qu *et al.* (2006) presentaron un diagrama como el de la figura 18, donde se indica el cambio de forma de cristal que depende de la temperatura del ambiente y también del grado de saturación del agua en el aire, para su posterior transformación a hielo. Para la temperatura de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa que los cristales tienen forma de placas hexagonales, conforme se aumenta el grado de saturación, aumenta el número de placas que crecen a lo ancho como extensiones, formando estructuras similares a los copos de nieve.

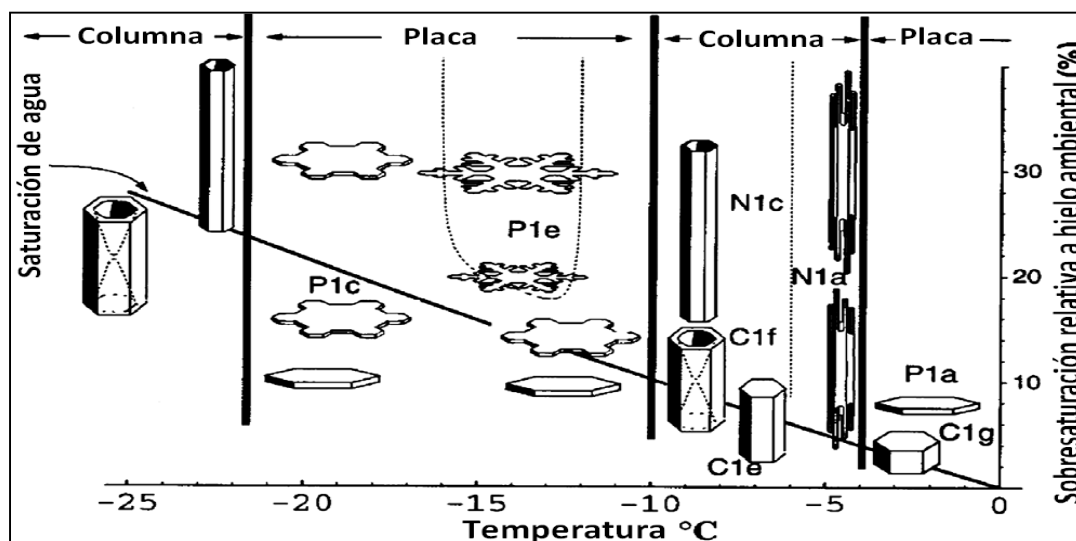


Figura 18. Crecimiento de cristales a diferentes ambientes. (Qu *et al.*, 2006).

1.4.5 Propiedades termofísicas de la escarcha

La conductividad térmica y la densidad son las propiedades más importantes de la escarcha, la primera porque incrementa la resistencia térmica entre el aire y la superficie fría (Qu *et al.*, 2006) y la segunda debido al fenómeno de densificación (aumento de la densidad) de la capa de escarcha respecto al tiempo, por el depósito de vapor de agua procedente del aire húmedo; además existe una relación directa entre estas dos propiedades, es decir si la escarcha es más densa, la conductividad térmica aumenta (Gatica *et al.*, 2009).

Tabla 4. Ecuaciones de predicción para calcular propiedades termofísicas de escarcha.

Propiedad Termofísica	Unidades	Ecuación	Autor y año
Conductividad térmica del hielo	(W/m K)	$k_i = \frac{630}{T}$	(Kim <i>et al.</i> , 2009) (Gatica <i>et al.</i> , 2009)
Porosidad del aire en la escarcha	-	$\varepsilon_a = 1 - b_1 \exp[b_2(T_f - 273.15)]$	(Kim <i>et al.</i> , 2009)
Coefficiente de difusión de masa	(m ² /s)	$D_{AB} = 1.451E^{-04} \frac{T^{1.72}}{P_{atm}}$	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)
Capacidad calorífica del hielo	(J/kg °C)	$Cp_i = 2109 + 3.66(T - 273.15)$	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)
Calor latente de sublimación	(J/kg)	$l_{ig} = (-0.047(1.8(T - 273) + 32) + 1220)2322$	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)
Densidad de escarcha	(kg/m ³)	$\rho = \varepsilon \rho_i + (1 - \varepsilon)(\rho_a + \rho_v)$	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)
Porosidad de escarcha	-	$\sigma = \frac{\rho_i - \rho}{\rho_i - \rho_p} \quad \rho_p = \rho_v + \rho_a$	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)
Conductividad térmica del aire*	(W/mK)	$k_{air} = (1.0465 + 0.017T) \times 10^{-5}$	(Sahin, 2000)
Densidad de cristales en sublimación	(kg/m ³)	$\rho_c = (-10429.56) + 41.57T$	(Sahin, 2000)

Propiedad Termofísica	Unidades	Ecuación	Autor y año
Densidad del hielo	(kg/m ³)	$\rho_i = \frac{1}{(1.0907E^{-03} + 1.4635E^{-07}T)}$	(Gatica <i>et al.</i> , 2009)
Densidad de la escarcha	(kg/m ³):	$\rho_f = 650^{0.227(T_f - 273.15)}$	(Hayashi <i>et al.</i> , 1977)
Conductividad térmica de escarcha	(W/mK)	$k_{fc} = 1.202 \times 10^{-3} (\rho_c)^{0.963}$	(Sahin, 2000)

Diversos autores han presentado ecuaciones para calcular las propiedades termofísicas de escarcha, éstas se analizarán en detalle y se definirán cada uno de sus términos en el análisis de resultados.

La escarcha puede observarse fácilmente en alimentos congelados como por ejemplo, pavo, brócoli, maíz y hamburguesas, en esta investigación se utilizó carne de lomo de cerdo. En este sentido, resulta de interés determinar el mecanismo de formación de escarcha y sus propiedades termofísicas, puesto que en la literatura no se cuenta con información acerca de la densidad, conductividad térmica y porosidad de la escarcha para el caso de alimentos, por lo que en este trabajo, se analizará por medio de ecuaciones empíricas el comportamiento durante la formación-fusión de escarcha y de sus propiedades termofísicas.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

Objetivo general

Evaluar el efecto del tiempo de congelación criogénica y de la humedad relativa durante el periodo de estabilización en cámara de congelación-almacenamiento, que permitan el análisis del comportamiento en la formación y fusión de escarcha sobre carne porcina congelada.

Objetivos particulares

(1) Evaluar el efecto del tiempo de congelación con nitrógeno líquido en la temperatura superficial de la carne porcina, analizando el comportamiento de la formación de escarcha y sus propiedades termofísicas: conductividad térmica, densidad y porosidad; y físicas como espesor.

(2) Evaluar el efecto del tiempo de congelación durante el periodo de estabilización dentro de cámara sobre la temperatura superficial de escarcha, analizando el comportamiento de formación-fusión y sus propiedades termofísicas.

(3) Obtener el comportamiento de formación-fusión de escarcha, determinando el efecto del cambio de humedad relativa por la apertura y cierre de puerta en cámara, durante el periodo de estabilización de la temperatura de congelación con nitrógeno-almacenamiento en cámara.

2.1 Descripción experimental

En la figura 19 se presenta el cuadro metodológico que describe de manera general el desarrollo experimental que se llevó a cabo para cumplir con los objetivos planteados.

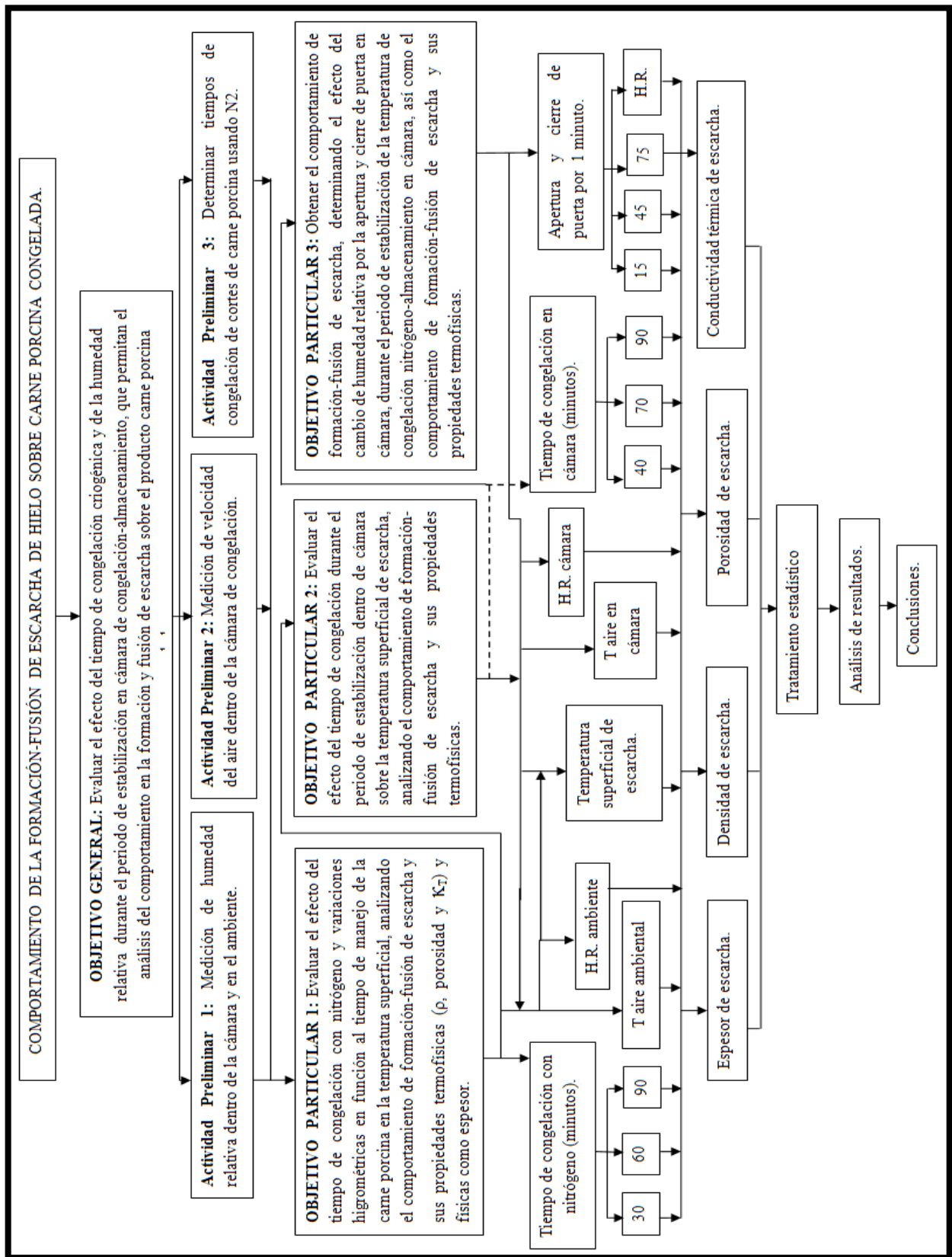


Figura 19. Cuadro metodológico

2.2 Características y control de materia prima

Durante la experimentación se trabajó con cortes de lomo de cerdo. Las condiciones de sacrificio fueron constantes, el animal se sacrificaba el día anterior al cual se llevaba a cabo la experimentación, de esta manera la carne siempre tenía un día de rigor mortis y se seleccionó siempre al mismo proveedor. Se utilizó lomo de cerdo debido a que es un músculo liso, magro y suave, que presenta una disposición de fibras musculares en una sola dirección. El corte siempre se realizó mediante un solo movimiento.

La temperatura a la cual el lomo de cerdo fue recibido en el laboratorio fue de aproximadamente 8 ± 1 °C, mientras se realizaban los cortes, la temperatura de los mismos aumentó al estar expuestos al aire del ambiente, por tanto, la temperatura de los cortes de carne antes de ser sometidos al proceso de congelación siempre fue superior a 20 °C y no mayor a 27 °C. Se establecieron límites para la masa de los cortes de carne, procurando que ésta estuviera entre 30 y 40 g, así mismo, para el largo se tuvo un límite de 10 a 13 cm y de 4 a 6 cm para el ancho, el espesor fue de 0.5cm, esto puede ser notado en la figura 20.

Primeramente, se congelaron cortes de lomo de cerdo sin envase mediante una congelación criogénica y posteriormente se pasaron a una cámara de congelación, para analizar la formación-fusión de escarcha sobre el producto.

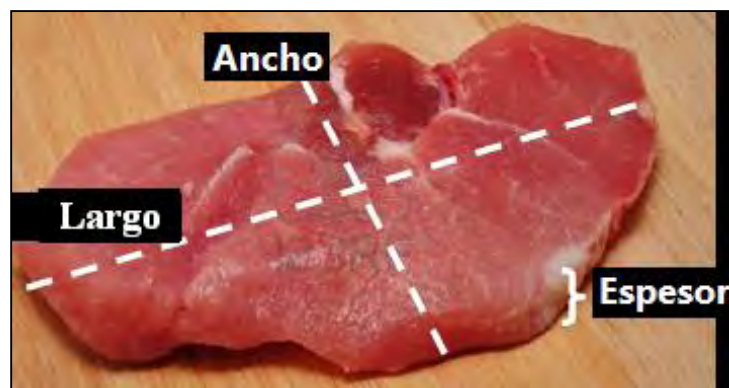


Figura 20. Medidas del corte de lomo de cerdo.

2.3 Actividades preliminares

2.3.1 Medición de humedad relativa dentro de la cámara y en el ambiente

Se midió la humedad relativa del aire ambiental en el laboratorio, para esto se utilizó el higró-termo-anemómetro EXTECH modelo 407412. Se utilizó el higrómetro OAKTON® modelo EW-35710-10 para medir la humedad relativa dentro de la cámara de congelación, dado que este higrómetro mide la humedad relativa a bajas temperaturas (por debajo de los 0 °C) y su tiempo de respuesta fue de 14 minutos.

2.3.2 Medición de velocidad del aire dentro de la cámara de congelación

La cámara se dividió en 8 zonas como se muestra en la figura 21 (a) del lado izquierdo, posteriormente en cada una de las zonas mediante un higró-termo-anemómetro, se midió la velocidad del aire; las medidas de la cámara son 1.5 m de alto, 0.65 m de largo y 0.6 m de ancho.

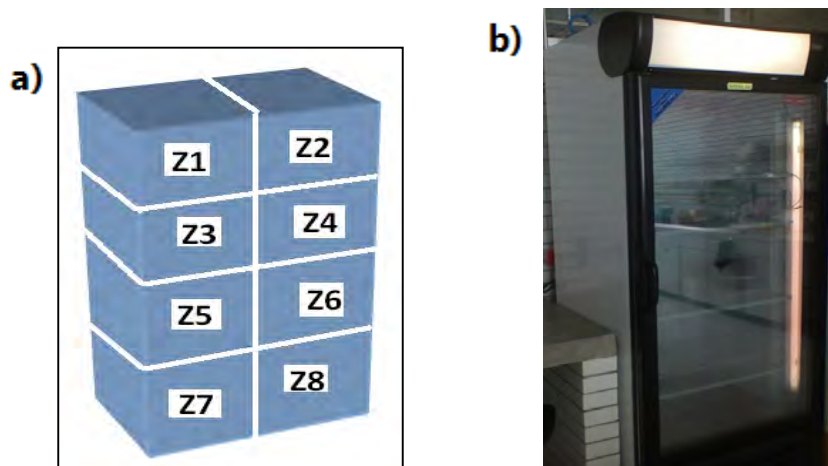


Figura 21 a) Zonas de la cámara de congelación. b) Fotografía de cámara de congelación por convección forzada.

Inicialmente la cámara de congelación se encontraba a una temperatura de -20 °C, para medir la velocidad del aire, se utilizó un anemómetro de hilo caliente, dicho equipo no puede medir la velocidad del aire debajo de 0 °C, dado que a esas temperaturas no hay dilatación térmica del hilo. Por lo tanto, se apagó el compresor de la cámara para que la temperatura estuviera por encima de los 0 °C y de esta manera se midió la velocidad del aire.

2.3.3 Cálculo de velocidad de congelación

De acuerdo a Genot (2003), la velocidad de congelación se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_c = \frac{PIC - T_f}{t_f - t_i} \quad \dots \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

V_c= velocidad de congelación (°C/s)

PIC= punto inicial de congelación del alimento (°C)

T_f= Temperatura final del producto una vez finalizado el proceso de congelación (°C)

t_f= tiempo total que duró el proceso de congelación (s)

t_i= tiempo inicial (generalmente 0 s)

2.3.4 Determinación de tiempos de congelación de cortes de carne porcina con nitrógeno

Los tiempos de congelación con nitrógeno líquido se determinaron experimentalmente, se colocó un termopar tipo “T” (cobre-constantan) al centro geométrico de los cortes de carne porcina como se muestra en la figura 22, considerando dicho punto como centro térmico de la muestra; se observa que el termopar fue colocado de forma tal que quedó perpendicular al diámetro del corte de carne, y se colocó otro termopar para medir la temperatura del medio de congelación. Esto con el fin de obtener las historias térmicas partiendo de una temperatura inicial de 20 °C a una temperatura menor a -18 °C, donde toda actividad microbiana se detiene.

Los termopares se conectaron a un registrador de datos, donde se monitoreó la temperatura cada segundo, de esta manera mediante un software se graficaron las historias térmicas. Las muestras se congelaron durante un tiempo aproximado de 30, 60 y 90 minutos. Cabe resaltar que las muestras no tuvieron contacto directo con el nitrógeno líquido, sino con la charola metálica, por lo cual se dice que la congelación fue contacto indirecto, esto se muestra en la figura 23 a).



Figura 22. Posición del termopar en el corte de carne porcina.

2.4 Actividades particulares

2.4.1 Evaluación del efecto del tiempo de congelación con nitrógeno

Para esto se partieron dos cortes de carne de lomo de cerdo (*Longissimus dorsi*) de 0.5 cm de espesor, dichos cortes se volvieron a partir a la mitad para obtener cuatro partes, posteriormente se midieron y se pesaron. La congelación con nitrógeno líquido fue por contacto indirecto, los cortes se colocaron sobre una charola de acero inoxidable como se advierte en la figura 23 a) y ésta fue colocada dentro de un recipiente DEWAR (ver figura 23 b) con nitrógeno líquido dónde se realizó la congelación a diferentes tiempos de 30, 60 y 90 minutos.



Figura 23 a) Acomodo de cortes de carne sobre la charola metálica.

b) Recipiente Dewar.

Al terminar los diferentes intervalos de tiempo, la charola se sacó del recipiente DEWAR y se expuso al aire ambiental del laboratorio durante un 1 minuto para que se formara la escarcha sobre los cortes de lomo. Una vez formada la escarcha, el corte de lomo se colocó en el estereomicroscopio LEICA® modelo EZ4D (figura 24), con luz media y con un aumento de 35x, para tomar fotografías de la escarcha superficial. El corte se encontraba expuesto a la temperatura del ambiente (27 °C), por tanto, éste se sometió a un proceso de descongelación, de esta manera, cada minuto se tomó una fotografía a la escarcha mediante el estereomicroscopio; también mediante un higró-termo-anemómetro se midió la humedad relativa, la temperatura del aire y la temperatura superficial de la escarcha se determinó mediante el termómetro láser infrarrojo FLUKE® modelo 566 hasta que ésta se fundió completamente.



Figura 24. Estereomicroscopio LEICA

2.4.2 Evaluación del efecto del periodo de estabilización en cámara

De igual manera, los cortes se congelaron en la charola metálica mediante nitrógeno líquido durante 30, 60 y 90 minutos. Una vez terminado dicho intervalo de tiempo, los cuatro cortes se sacaron del recipiente DEWAR, se expusieron al aire ambiental durante un minuto e inmediatamente se introdujeron en la cámara de congelación a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los cortes congelados permanecieron almacenados por lapsos de 40, 70 y 90 minutos; a este periodo de amacenamiento en la cámara de congelación se le denominó como periodo de estabilización, posteriormente uno por uno los cortes se retiraron de la cámara y se colocaron en el estereomicroscopio, finalmente se tomaron fotografías a la escarcha y se midió la humedad relativa, temperatura del aire y temperatura superficial de escarcha cada minuto, hasta que la escarcha superficial se fundió.

2.4.3 Determinación del efecto del cambio de humedad relativa por la apertura y cierre de puerta en cámara

Se siguió el mismo procedimiento anterior, los cuatro cortes se sacaron del recipiente de congelación criogénica, salvo el primer corte se colocó en el estereomicroscopio para observar el espesor de la escarcha y los cortes restantes inmediatamente se introdujeron en la cámara de congelación a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Después de 15 minutos de almacenamiento en cámara se hizo una apertura y cierre de la puerta de la cámara de congelación durante un minuto y las aperturas posteriores se realizaron cada media hora. Los cortes congelados permanecieron almacenados por lapsos de 40, 70 y 90 minutos, posteriormente uno por uno se retiraron de la

cámara y se colocaron en el estereomicroscopio para realizar el mismo análisis a la escarcha. Cabe mencionar que los datos de humedad relativa y la temperatura del aire dentro de la cámara mediante un higrómetro se obtuvieron cada 15 minutos, durante toda la corrida experimental.

2.4.4 Determinación de espesor de escarcha

El espesor de escarcha fue determinado mediante el programa ADOBE PHOTOSHOP CS5 EXTENDED.

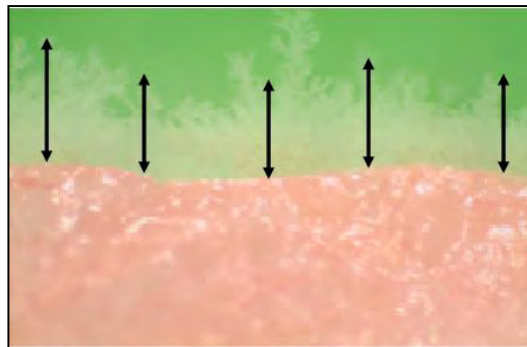


Figura 25. Medición de espesor de escarcha.

Para esta actividad se traslapó la última imagen que se tomó a la muestra donde la escarcha se había fundido completamente, sobre la primera imagen con escarcha superficial visible sobre el corte de carne, esto con el fin de observar y medir el espesor de la misma presente sobre los cortes de carne porcina, con base en lo presentado por Meléndez *et al.*, (2011), esto se muestra más claramente en la figura anterior. Esta actividad fue de suma importancia dado que el espesor de escarcha es la única variable que pudo medirse cuantitativamente y con mayor precisión, en comparación con la densidad o la conductividad térmica que fueron determinadas mediante ecuaciones empíricas.

2.4.5 Cálculo de propiedades termofísicas

Mediante las ecuaciones de predicción presentadas por Kim *et al.*, (2009), Gatica *et al.*, (2009), Sahin, (2000), en la tabla 3 se procedió al cálculo de las propiedades termofísicas en el programa EXCEL utilizando el valor de la temperatura superficial de la escarcha.

Para cada nivel de variación se realizaron 3 réplicas, se trabajó con un análisis de varianza utilizando el software MINITAB 15.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan las actividades preliminares y los resultados más relevantes que llevaron a cubrir los objetivos planteados. Se muestran las curvas de congelación, imágenes, gráficas comparativas obtenidas de los valores promedio del análisis de varianza realizado mediante el software MINITAB 15, dicho análisis permitió determinar la influencia de las variables propuestas sobre las propiedades termofísicas de la escarcha.

3.1 Actividades preliminares

3.1.1 Resultados de medición de velocidad del aire

En la siguiente tabla se presentan los resultados de la velocidad del aire dentro de la cámara de congelación.

Tabla 5. *Velocidad del aire en diferentes zonas de la cámara de congelación.*

Zona dentro de cámara	Velocidad promedio por zona (m/s)	Desviación estándar (\pm)
1	0.3333	0.115
2	0.4667	0.057
3	0.4	0.2
4	*0.5667	0.057
5	*0.5667	0.057
6	0.4667	0.057
7	0.5000	0
8	0.3667	0.057

*Mayor velocidad de aire

El objetivo de esta actividad fue seleccionar la zona con mayor velocidad del aire, debido a que ésta aumentará el espesor de escarcha sobre los cortes de carne (Mago y Sherif, 2005). De acuerdo a la Tabla 5 las velocidades del aire más altas se registraron en las zonas 4 y 5, los cortes de carne porcina fueron colocados en la zona 4.

3.1.2 Resultados de tiempos de congelación criogénica de cortes de carne porcina

Con respecto a los tiempos de congelación criogénica por contacto indirecto, en la figura 26 se muestran las curvas de congelación, obtenidas a partir de los valores promedio de temperatura en el centro térmico de los cortes de carne.

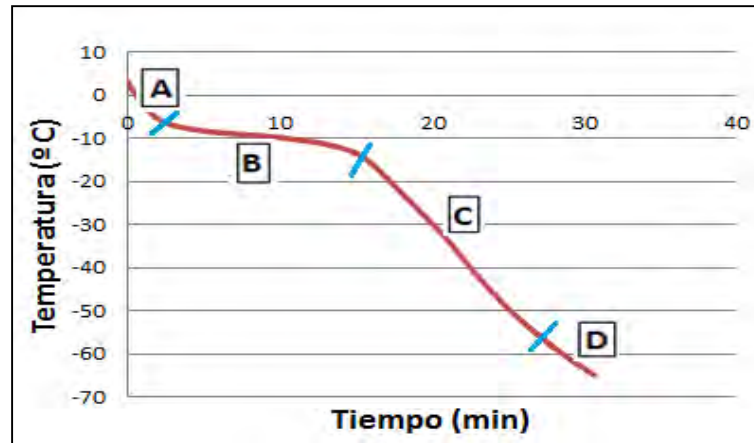


Figura 26. Curva para congelación criogénica.

En la figura 26, se puede observar que a los 17 minutos ya se había extraído el calor latente de la carne para formar los cristales de hielo, después de este lapso de tiempo comenzó a eliminarse calor sensible. Cabe mencionar que la velocidad de congelación va cambiando a lo largo de la curva, pueden apreciarse cuatro cambios en la pendiente de la misma, iniciando con la etapa A que va del minuto 0 hasta los 2.5 minutos, posteriormente la etapa B que está comprendida entre los 2.5 a 16.5 min, C de 16.5 a 27 min, y la última D 27 a 30 min. La menor pendiente corresponde a la etapa B, por tanto durante ésta se extrajo principalmente calor latente del alimento porque es dónde se tuvo la menor variación de temperatura, mientras que en las pendientes A, C y D se extrajo el calor sensible.

La velocidad de congelación se calculó de la siguiente manera con la ecuación (1), utilizando los valores de promedio de la congelación criogénica. El PIC se determinó analizando el cambio de pendiente en las curvas de congelación y se comparó con el valor de Dossat (2009).

$$V_c = \frac{-1.5 - (-65.96)}{30 - 0} = 2.14^\circ\text{C}/\text{min}$$

La velocidad de congelación obtenida fue mayor que $1^\circ\text{C}/\text{min}$, por lo tanto, se corroboró que se tuvo una congelación rápida con nitrógeno líquido.

3.2 Efecto del tiempo de congelación criogénica

3.2.1 Temperatura superficial de escarcha

De acuerdo con Cheng y Shiu (2002), a mayor tiempo de congelación con nitrógeno líquido la temperatura superficial de la escarcha es menor, dado que la temperatura de los cortes de carne disminuye. Aquí se estudió el efecto del tiempo de congelación como variable.

Los cortes de carne porcina fueron congelados con nitrógeno líquido durante 30, 60 y 90 min por contacto indirecto, al finalizar la congelación, en los cortes de carne se obtuvo una temperatura superficial de escarcha de -35 °C (promedio a partir de nueve repeticiones), la cual fue aumentando hasta 0 °C , la temperatura superficial se midió cada minuto mientras los cortes se sometieron a un proceso de descongelación, dado que éstos se expusieron al aire del ambiente el cual se encontraba a una temperatura de $28 \pm 1\text{ °C}$. Como se observa en la figura 27, el efecto del tiempo de congelación no influyó significativamente en la temperatura superficial de escarcha. Esto fue debido a que como se vió anteriormente la velocidad de congelación criogénica es rápida, por lo tanto no es preciso aumentar el tiempo de congelación, dado que en 30 minutos se alcanzan temperaturas superficiales de aproximadamente -35 °C .

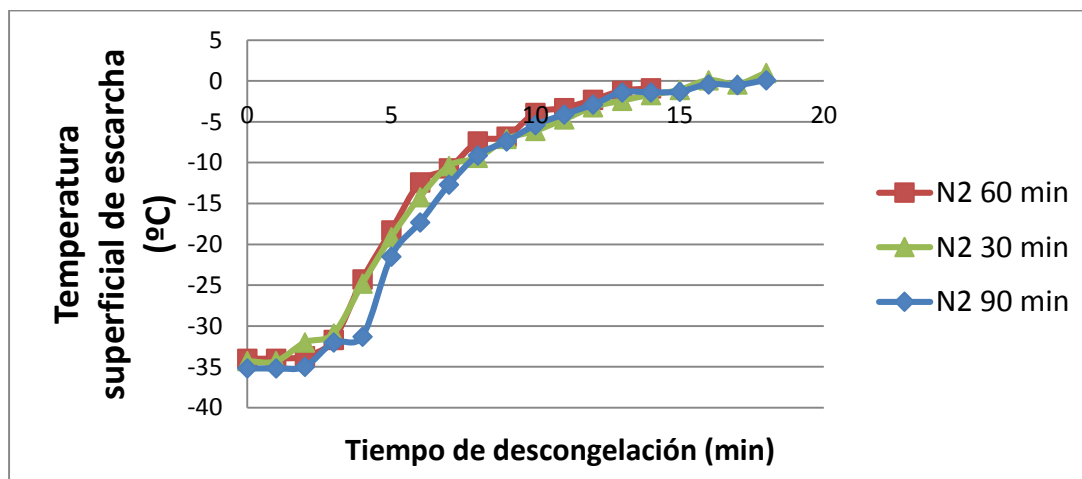


Figura 27. Gráfica de descongelación para distintos tiempos de congelación criogénica.

3.2.2 Espesor de escarcha

En la siguiente imagen se muestran los espesores de escarcha obtenidos respecto a los diferentes tiempos de congelación criogénica, a partir del análisis de imágenes a los cortes de carne porcina, se logró obtener la medida real de los espesores de escarcha [cm].

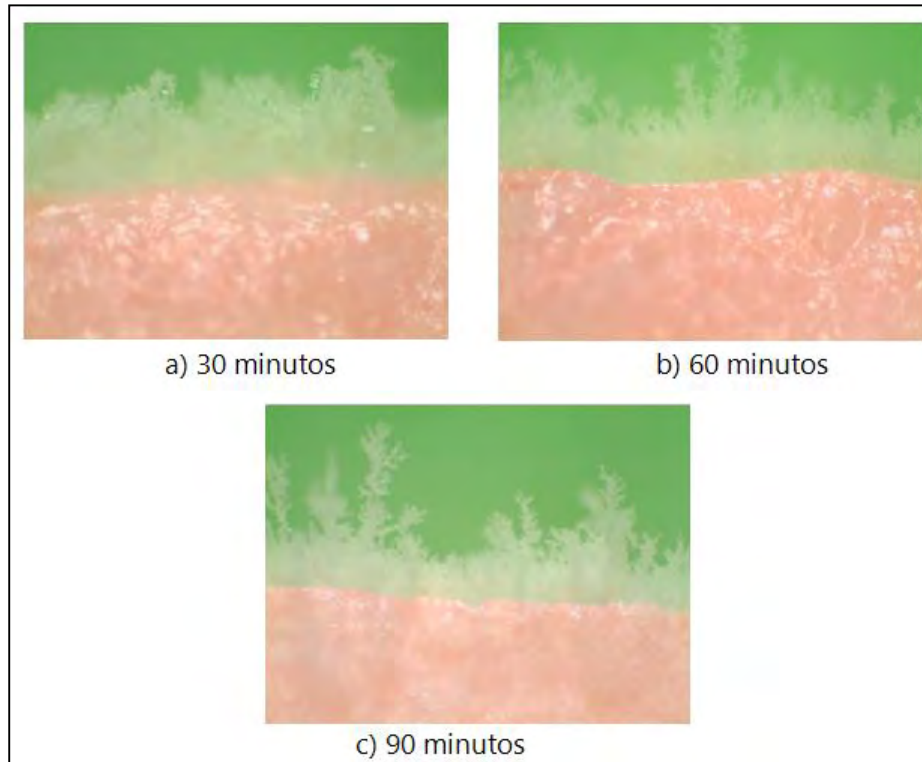


Figura 28. Formación de escarcha en función al tiempo de congelación criogénica sobre cortes de carne.

Conforme a lo estudiado por Hermes *et al.* (2009), a menor temperatura superficial de escarcha, puede obtenerse un mayor espesor de la misma. En la figura 28 puede notarse que al aumentar el tiempo de congelación criogénica, no necesariamente aumentó el espesor de la escarcha como se esperaba, puesto que el espesor de escarcha promedio para 30 min de congelación criogénica fue de 0.48 cm, para 60 min 0.42 cm y para 90min 0.25 cm, esto fue debido al efecto de la humedad relativa el cual se explicará posteriormente.

Con base en el análisis de varianza para el tiempo de congelación con nitrógeno, se obtuvo que éste factor no tuvo un efecto significativo en el espesor de la escarcha.

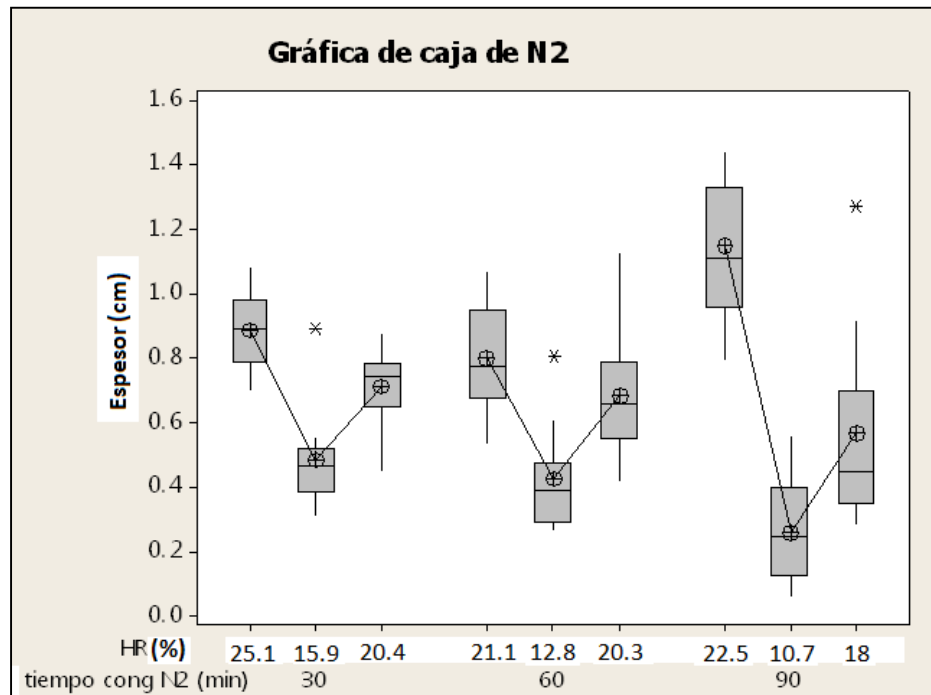


Figura 29. Gráfica de caja para congelación criogénica

No obstante, para la muestra congelada durante 90 min, en la figura 29 se observa que el efecto combinado dicho tiempo de congelación y de humedad relativa (22.5%) influyen sobre el aumento del espesor de escarcha. Al comparar las corridas de congelación criogénica, se observa que para niveles altos (20-25%) de humedad relativa, se obtuvieron mayores espesores de escarcha, mientras que niveles bajos de humedad (10-15%) dieron como resultado espesores menores (0.45-0.24cm), esto tiene concordancia con los resultados de Lee y Roo, (2005), Luer y Beer (2000) y Himmelblau (2000).

Además, se aprecian diferencias especialmente para niveles medios de humedad relativa (15-20%), dónde se tiene mayor dispersión en los valores de espesor de escarcha para 60 y 90 minutos, el valor de F fue de 65.15 para la humedad relativa por lo que ésta significó una variable de influencia en el espesor de la escarcha.

3.2.3 Influencia de la humedad relativa

Se tomaron 6 réplicas de congelación criogénica, donde el tiempo de congelación fue de 30 minutos para todas las muestras; esto con el fin de determinar el efecto de la humedad relativa sobre el espesor de escarcha (figura 30). De acuerdo con Kandula (2011), la humedad relativa tiene un efecto mayor sobre el espesor de escarcha en comparación con la velocidad y la temperatura del aire.

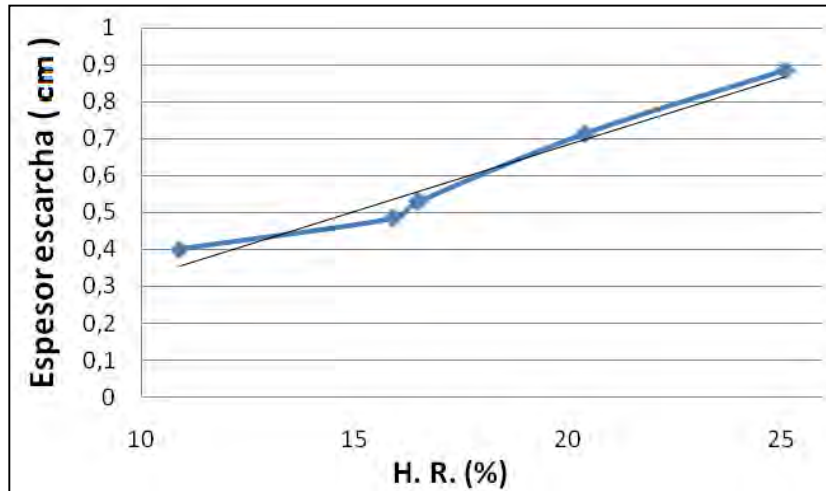


Figura 30. Espesor de escarcha respecto a variaciones de humedad relativa.

$$HR[\%]=0.036 \chi [cm] - 0.037$$

En la figura 30, se muestra el efecto de la humedad relativa sobre el espesor de escarcha formada sobre los cortes de carne porcina, obteniéndose un comportamiento lineal. De acuerdo a lo estudiado por Cheng y Shiu (2002) y Gatica *et al.* (2009), una mayor humedad relativa aumenta el espesor de escarcha, esto se explica porque se tiene una mayor cantidad de agua disponible en el aire la cual puede ablimarse sobre la superficie de la carne.

3.2.4 Comportamiento de formación-fusión de escarcha

Se evaluó la variación del espesor de escarcha sobre los cortes de carne respecto al tiempo (figura 31). Las condiciones experimentales del aire fueron temperatura 29.4 ± 1.5 °C y humedad relativa 20%, mientras que para el modelo propuesto por Mannapperuma y Singh (1987), fueron de 14.6 °C y 61% respectivamente (figura 32).

Para obtener la figura 31, mediante el programa PHOTOSHOP CS5 se midió el espesor de escarcha en las fotografías que se tomaron cada minuto, para observar las distintas fases de formación-fusión de escarcha y comparar el modelo teórico con el práctico.

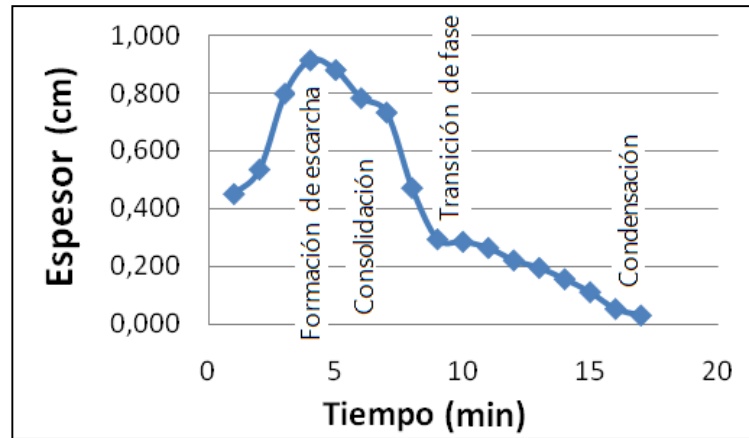


Figura 31. Variación del espesor de escarcha respecto al tiempo, congelación criogénica experimental.

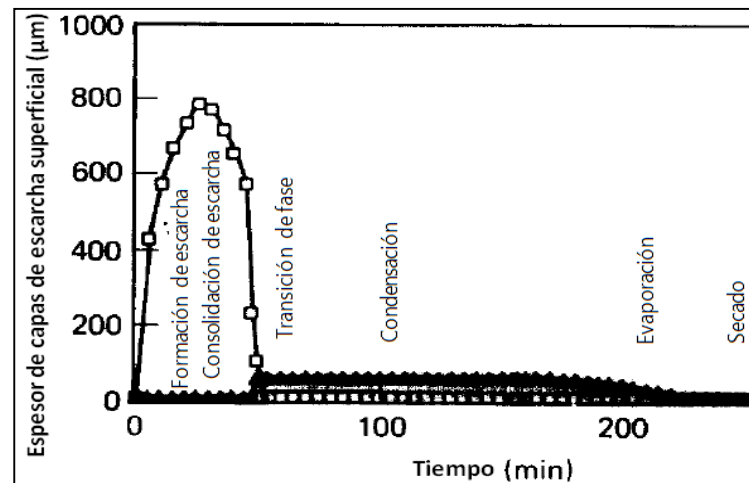


Figura 32. Modelo de variación del espesor de escarcha respecto al tiempo.

□ Capa de escarcha; ▲ capa de agua; (Mannapperuma y Sigh, 1988).

Cabe mencionar que el comportamiento obtenido figura 31 es muy similar al del modelo de la figura 32, en la figura pueden distinguirse cuatro etapas: formación, consolidación, transición de fase y condensación de la escarcha. Esto fue debido a que los materiales utilizados para ésta investigación cortes de carne de cerdo y geles de tilosa en el caso de ambas correspondieron a

superficies hidrofílicas que pueden establecer puentes de hidrógeno debido a la naturaleza polar de la molécula de agua (Hoke *et al.*, 2000). Se comprobó que el comportamiento teórico de la escarcha puede llevarse a cabo en la práctica, sin embargo, no sucedió así para todas las réplicas porque la etapa de transición de fase predominó debido a la temperatura del aire de aproximadamente 29 °C; se requiere que la temperatura del aire sea más baja para observar todas las etapas de formación de escarcha como fue el caso de Mannaperuma y Sigh (1988) la cual fue de 14.6 °C.

3.3 Propiedades termofísicas

El interés por determinar a través de un modelo matemático las propiedades termofísicas de la escarcha tales como: densidad, conductividad térmica y porosidad, es esencial debido a que mediante éstas se puede determinar el comportamiento físico de la escarcha durante sus distintas etapas de crecimiento y permite analizar como se llevan a cabo los fenómenos de transferencia de calor y masa.

3.3.1 Porosidad de escarcha

Para calcular la porosidad de la escarcha por contenido de aire, se utilizó la ecuación de Kim *et al.* (2009) que se presenta a continuación.

$$\varepsilon_a = 1 - b_1 \exp[b_2(T_f - 273.15)]$$

Donde:

ε_a = porosidad de escarcha (adimensional)

b_1 = 0.709721

b_2 = 0.228726

T_f = temperatura superficial de escarcha (K)

Para obtener este modelo de correlación, Kim *et al.* (2009) realizaron un análisis de regresión (a partir 100 datos de temperatura entre -20 y 0 °C) para la porosidad en términos de la temperatura de escarcha, donde los parámetros b_1 y b_2 o coeficientes de regresión son valores que se mantienen constantes.

Utilizando la ecuación de Kim *et al.*, (2009) se obtuvo la gráfica de la figura 33, en este estudio se reportó que si la temperatura de la escarcha disminuye, entonces la porosidad del aire dentro de la escarcha aumenta, mientras que si la temperatura aumenta, tal como se llevó a cabo para esta investigación (proceso de descongelación), la porosidad disminuye. De acuerdo con Mannapperuma y Singh (1987), este fenómeno se fundamenta en la difusión del vapor de agua dentro de la escarcha, debido al aumento de la temperatura del vapor que va llenando los poros de la misma y paulatinamente la capa de hielo se va fundiendo.

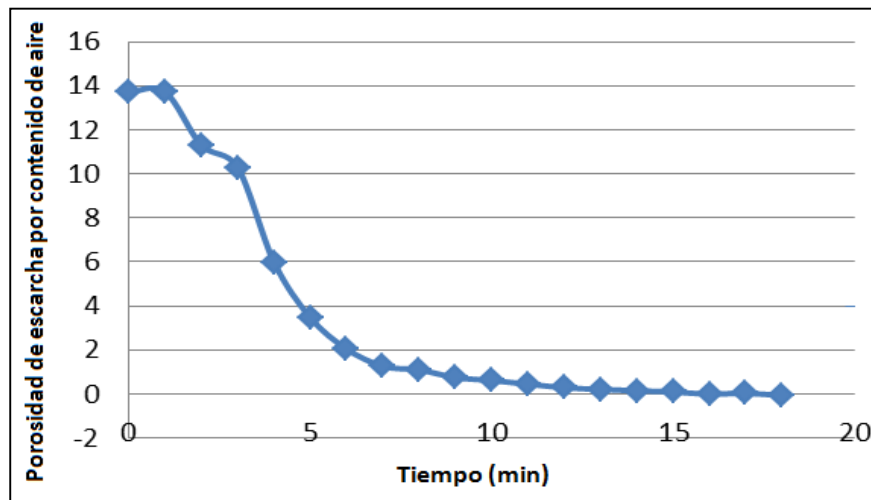


Figura 33. Porosidad de la escarcha por contenido de aire (Kim *et al.*, 2009).

La ecuación de Gatica *et al.* (2009) para la porosidad es la siguiente:

$$\sigma = \frac{\rho_l - \rho}{\rho_l - \rho_p}$$

Donde:

σ = porosidad de la escarcha

ρ_l = densidad del hielo (kg/m³)

ρ = densidad de escarcha (kg/m³)

ρ_p = densidad del poro de escarcha (kg/m³)

Para calcular la densidad Gatica *et al.* (2009) propusieron la siguiente ecuación.

$$\rho_i = 1/(0.0010907 + 1.4635E - 07T)$$

Donde:

ρ_i = densidad del hielo (kg/m³)

T=temperatura de la escarcha (K).

Al multiplicar la temperatura por un valor tan pequeño, provoca que la densidad de la escarcha se mantenga constante a pesar de que la temperatura cambie. Gatica *et al.* (2009) consideraron la porosidad en su ecuación de predicción como una propiedad constante, dado que para sus condiciones experimentales no estudiaron la variación de temperatura, por tanto el valor de la densidad del hielo no cambió respecto a ésta. Sin embargo, en este caso al tener una transición de fase debida al cambio de temperatura, es difícil suponer que la porosidad de la escarcha se mantenga constante. Por tanto, la ecuación de Gatica *et al.* (2009) no se utilizó en este trabajo para calcular la porosidad de la escarcha.

3.3.2 Densidad de escarcha

Como se muestra en la tabla 6, la densidad de escarcha tuvo el mismo comportamiento para los niveles de variación de tiempos de congelación con nitrógeno líquido; a menor temperatura de escarcha, la densidad fue menor tal como se evidencia en los resultados de Sahin (2000).

Tabla 6. Comparación de la densidad de escarcha según ecuaciones de predicción.

Temperatura escarcha [°C]	Sahin (2000) [kg/m ³]	Lee y Roo (2005) [kg/m ³]	Hermes <i>et al.</i> , (2009) [kg/m ³]	Kim <i>et al.</i> , (2009) [kg/m ³]	Erland (2009) [kg/m ³]
-19.1	113.5	(112 - 120)	100	-	-
0	910.3	-	250	924.14	916.8

Según Hermes *et al.* (2009) y Lee y Roo (2005), este comportamiento puede deberse a que cuando se tiene una menor temperatura, se aumenta el gradiente de temperatura entre el aire del ambiente y la temperatura superficial de escarcha, dicho gradiente induce el crecimiento rápido de cúmulos de hielo y por tanto existe mayor cantidad de poros llenos de aire dentro de la escarcha; de esta manera el vapor de agua no se condensa sobre la superficie fría en este caso el lomo de cerdo, en lugar de esto se ablima.

Por otro lado, a medida que la temperatura superficial de escarcha se incrementa, la densidad de escarcha aumenta debido al fenómeno de densificación, lo cual se relaciona con el fenómeno de la porosidad, es decir, esta última disminuye; mientras que si la temperatura es menor a 0 °C dentro la capa de escarcha, se presenta un fenómeno de transferencia de masa dónde el vapor de agua migra dentro de la estructura de hielo, llenando los poros de la escarcha y por lo tanto, paulatinamente aumenta la densidad de la misma (Mannapperuma y Sigh, 1988).

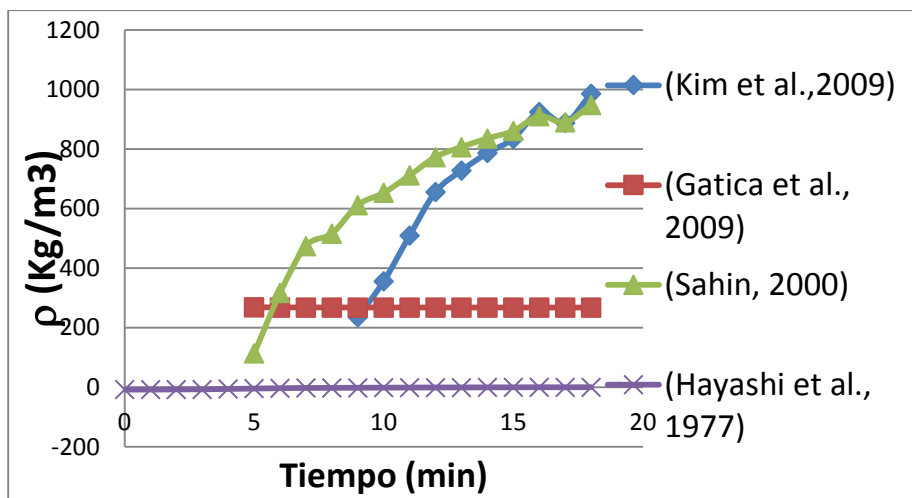


Figura 34. Comparación de ecuaciones de densidad respecto al tiempo durante descongelación.

Durante la descongelación de los lomos de cerdo, la temperatura superficial de la escarcha aumentó, de -35 a 1 °C en 20 min. De acuerdo con la figura 34 se comprobó que la densidad aumentó en dos ecuaciones la de Kim *et al.* (2009) y la de Sahin (2000), mientras que en las dos restantes la densidad se mantuvo constante. A continuación se describirán las ecuaciones que se utilizaron en este trabajo para obtener la densidad de escarcha.

La ecuación de Hayashi *et al.* (1977) es un modelo obtenido a partir de una correlación empírica, la cual se presenta a continuación.

$$\rho_f = a \exp(bT_s)$$

Donde:

ρ_f = densidad de escarcha (kg/m³)

T_s = temperatura superficial de escarcha (K)

Los coeficientes adimensionales $a= 650$ y $b= 0.277$ se mantienen constantes.

Al utilizar esta ecuación se obtuvieron valores de densidad menores a cero, los cuales no son coherentes debido a que ésta propiedad nunca puede tomar valores negativos. Como puede observarse en la figura 34, la densidad de escarcha permanece constante. Esto fue porque el valor de temperatura superficial de escarcha se multiplica por la constante b y posteriormente al realizar la operación exponencial, la densidad no cambió en el intervalo de temperatura que se analizó durante la descongelación de carne (-35 a 1 °C).

La ecuación de Gatica *et al.* (2009) para la densidad es la siguiente.

$$\rho = \varepsilon \rho_i + (1 - \varepsilon) (\rho_a + \rho_v)$$

Donde:

ρ = densidad de escarcha (kg/m³)

ε = fracción volumétrica de hielo en escarcha (adimensional)

ρ_i = densidad del hielo (kg/m³)

ρ_a = densidad del aire (kg/m³)

ρ_v = densidad del vapor de agua (kg/m³)

Esta ecuación considera adecuadamente el hecho de que en la escarcha haya aire dentro de la misma. Sin embargo, la ecuación de Gatica *et al.*(2009) se basa principalmente en la densidad del hielo. Esta propiedad es la que tiene un mayor valor numérico en comparación con los demás términos de la ecuación y ésta no cambió significativamente con respecto a la temperatura superficial de escarcha como puede observarse en la tabla 4.

Tabla 7. Densidad de hielo respecto al tiempo ecuación de Gatica *et al.*, (2009).

Tiempo [minutos]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad del hielo [kg/m ³]	888.37	888.37	888.11	887.98	887.28	886.62	886.06	885.62	885.50

Por otra parte, Sahin (2000) determinó que la densidad de los cristales de hielo está en función de la temperatura, la siguiente ecuación se basó en datos experimentales de estudios previos mediante la aproximación de mínimos cuadrados.

$$\rho_c = -10429.56 + 41.574T$$

Donde:

ρ_c = densidad de la escarcha (kg/m³)

T= temperatura superficial de escarcha (K)

Para una temperatura de escarcha de 0 °C mediante la ecuación de Sahin (2000) se obtuvo un valor de 906 kg/m³; para la misma temperatura Erland (2009) obtuvo un valor teórico de 916.8 kg/m³ que corresponde a la densidad del hielo no poroso. La ecuación describe adecuadamente el comportamiento de la escarcha durante la descongelación de los lomos, en la figura 34 se observa que la densidad aumenta conforme lo hace el tiempo de descongelación, porque la temperatura superficial de escarcha se incrementa. Éstos resultados tienen concordancia con Mannapperuma y Sigh (1988) y Hermes *et al.* (2009), pese al hecho de que la única variable considerada en la ecuación de Sahin (2000) es la temperatura.

Se presenta la ecuación de Kim *et al.* (2009), la densidad puede ser calculada en términos de la densidad del hielo, aire y vapor de agua.

$$\rho_f = \varepsilon_a(\rho_a + \rho_v) + (1 - \varepsilon_a)\rho_i$$

Donde:

ρ_f = densidad de la escarcha (kg/m³)

ε_a = porosidad de escarcha (adimensional)

ρ_a = densidad del aire (kg/m³)

ρ_v =densidad del vapor de agua (kg/m³)

ρ_i = densidad de hielo constante (917 kg/m³)

La densidad del aire y del vapor de agua pueden ser calculadas utilizando las ecuaciones del gas ideal.

$$\rho_v = \frac{P_{sat}(T)}{R_v T} \qquad \rho_a = \frac{P_a - P_{sat}(T)}{R_a T}$$

En la figura 34 se observa que la ecuación de Kim *et al.* (2009) presenta valores muy bajos durante la fase inicial de escarcha, en comparación con la ecuación de Sahin (2000). Además, la ecuación de es válida exclusivamente para valores de temperatura superficial de escarcha mayores que -7 °C.

En conclusión, la ecuacion de Sahin (2000) es la que se ajustó mejor para determinar la densidad de escarcha, debido a que considera el fenómeno de densificación, es decir en la figura 34 se observa que la densidad aumenta con respecto a la temperatura superficial y sus resultados concuerdan con los valores teóricos de densidad.

3.3.3 Conductividad térmica de escarcha

El valor de conductividad térmica para el hielo a 0 °C es de 2.25 W/mK (Shirk *et al.*, 2003), mientras que, para el agua líquida a la misma temperatura es de 0.564 W/mK, por lo tanto la conductividad térmica del hielo es cuatro veces mayor que la del agua líquida.

El valor de la conductividad térmica inicial del hielo obtenido durante la descongelación a partir de la ecuación de Gatica *et al.*, (2009) es de 2.6 W/m K a -32 °C el cual se ajusta a los valores esperados acorde con lo reportado por la literatura. Sin embargo, la escarcha está conformada por dos fases: hielo poroso y vapor, por tanto para determinar la conductividad térmica de la escarcha, se debe considerar la conductividad térmica del hielo y la del aire. Como puede observarse en la figura 35, la conductividad de la escarcha es muy baja en comparación a la del hielo, esto se debe principalmente al aire que está atrapado dentro de la misma, el cual se comporta como un aislante térmico.

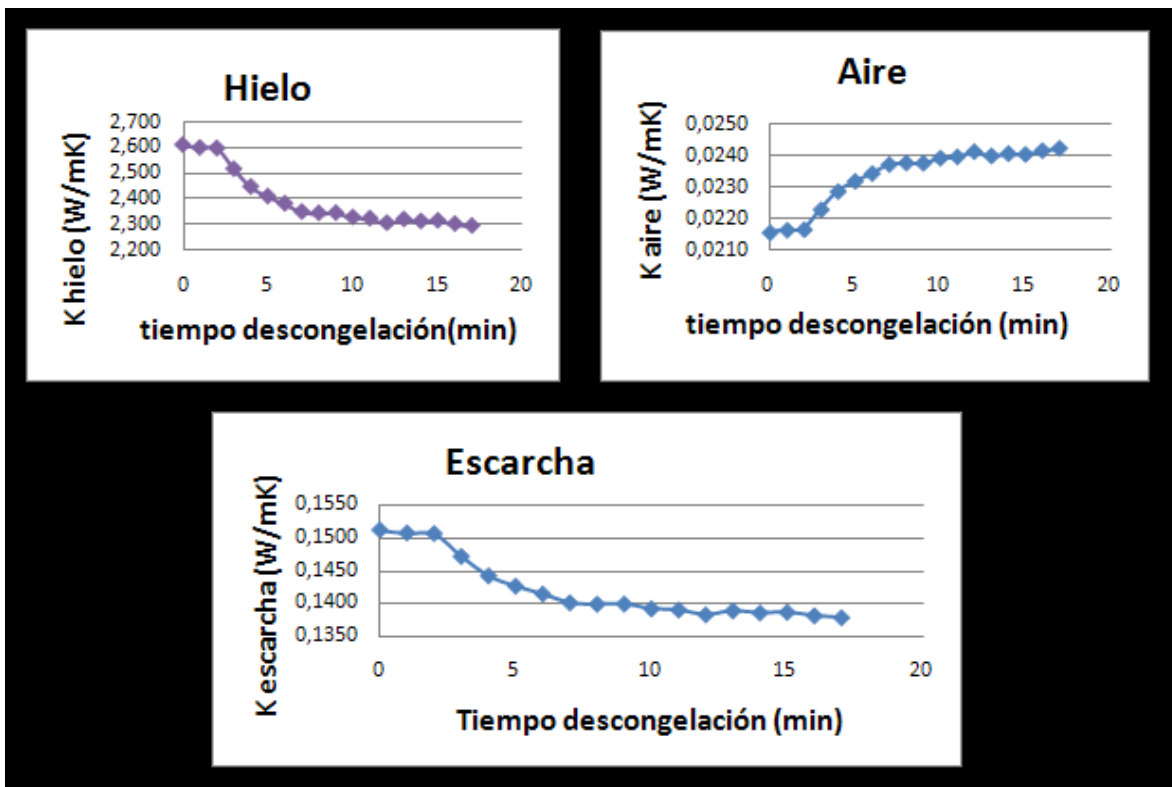


Figura 35. Variación de la conductividad térmica (Gatica *et al.*, 2009).

En el periodo de descongelación, durante el cual se presentó un cambio de fase, es decir la temperatura de la escarcha aumentó, el modelo matemático propuesto por Gatica (2009) no es adecuado, debido a que la conductividad térmica de la escarcha debe aumentar en lugar de disminuir (figura 35).

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_i + (1 - \varepsilon) k_a$$

Donde:

k_{eff} = conductividad térmica efectiva de escarcha (W/mK)

ε = fracción volumétrica de hielo en escarcha (adimensional)

k_i = conductividad térmica del hielo (W/mK)

k_a = conductividad térmica del aire (W/mK)

Esta ecuación está basada en la conductividad del hielo, sin embargo, no puede aplicarse para el caso de la escarcha, debido a que los valores obtenidos para la conductividad de escarcha son muy bajos ya que deberían ser de al menos 0.564 W/mK con respecto al dato teórico de Shirk *et al.* (2003). La conductividad debe comportarse de manera similar a la densidad, durante la transición de fase los poros de la escarcha se van llenando de vapor de agua, mientras que el hielo va fundiéndose, causando así que la porosidad de la escarcha disminuya, por tanto la conductividad térmica debe ser mayor, puesto que las moléculas de hielo y agua se encuentran más cercanas una de la otra (Askeland, 1987).

En la figura 36, se graficó la variación de la conductividad térmica de la escarcha conforme a las ecuaciones propuestas por Gatica *et al.*, (2009), Kim *et al.* (2009) y Sahin (2000). Aquí se observa que los valores de la ecuación de Gatica *et al.* (2009) son más bajos en comparación con las demás ecuaciones. A continuación se presentan las seis ecuaciones de Kim *et al.* (2009) para calcular la conductividad térmica de escarcha.

$$\frac{1}{k_{\text{per}}} = \frac{\varepsilon_a}{k_a} + \frac{1 - \varepsilon_a}{k_i}$$

$$\frac{1}{k_f} = \frac{a}{k_{\text{per}}} + \frac{1 - a}{k_{\text{par}}}$$

$$k_{\text{par}} = \varepsilon_a k_a + (1 - \varepsilon_a) k_i$$

$$k_i = \frac{630}{T}$$

$$a = 0.42(0.1 + 0.995^{\rho_f})$$

$$k_a = -3.381 \times 10^{-8} T^2 + 9.814 \times 10^{-5} T - 1.308 \times 10^{-4}$$

Donde:

k_f = conductividad térmica de escarcha (W/mK)

k_{per} = conductividad térmica flujo de calor perpendicular (W/mK)

k_{par} = conductividad térmica flujo de calor paralelo (W/mK)

ρ_f = densidad de la escarcha (kg/m^3)

ε_a = porosidad de escarcha (adimensional)

k_a = conductividad térmica del aire (W/mK)

k_i = conductividad térmica del hielo (W/mK)

T = temperatura superficial de escarcha (K)

Por otra parte, Sahin (2000) presentó un modelo matemático más sencillo para determinar la conductividad térmica.

$$k_{fc} = 1.202 \times 10^{-3} (\rho_c)^{0.963}$$

Donde

k_{fc} = conductividad térmica de escarcha (W/mK)

ρ_c = densidad de la escarcha (kg/m^3)

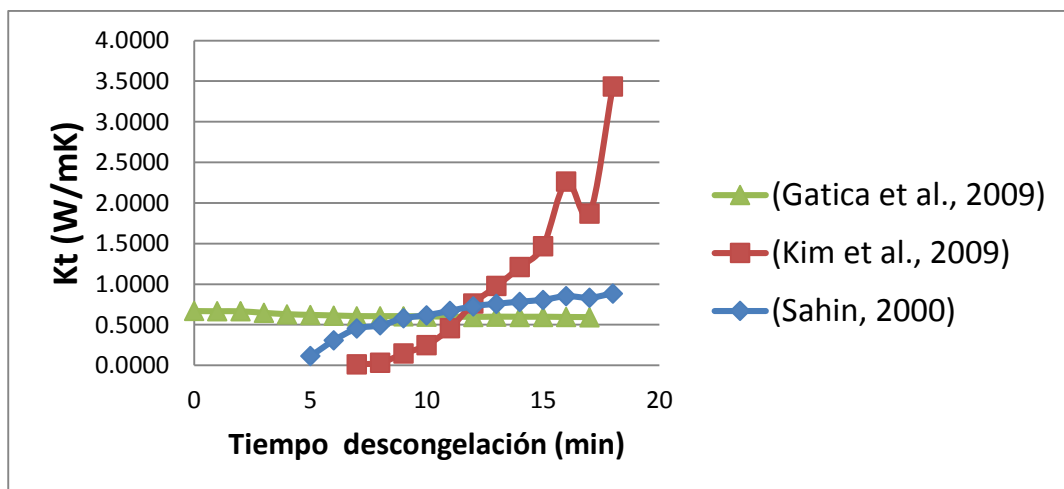


Figura 36. Variación de la conductividad térmica durante descongelación.

En la figura 36 se observan valores más altos de conductividad térmica para la ecuación de Kim *et al.*, (2009) en comparación con los de Sahin (2000). De acuerdo a Sharma *et al.*, (2003) la conductividad térmica del hielo a una temperatura de 0° C debe ser de aproximadamente 2.25 W/mK, el cual tiene concordancia con la ecuación de Kim *et al.*, (2009) que fue de 2.22 W/mK, mientras que para fue de 0.850 W/mK.

Cuando la temperatura superficial es de 1°C, ya no se tiene hielo sino agua líquida y su conductividad es de 0.564 W/mK, esto puede explicarse dado que después de la transición de fase, las moléculas de agua se encuentran más separadas que en el hielo, la ecuación de Kim *et al.* (2009) proporciona valores más altos de 3.4 W/mK, por tanto la ecuación sólo es útil para un intervalo de -10.4 a 0 °C, las ecuaciones de Kim *et al.* (2009) y Sahin (2000) mostraron mayor concordancia con los datos teóricos.

Durante la etapa de consolidación y transición de fase, es decir, a partir del segundo minuto, el agua se solidifica dentro de la misma, aumentando de esta manera su densidad, y también su conductividad térmica (figura 36). Partiendo del hecho de que la escarcha es más porosa que el hielo, la conductividad de ésta debe ser menor a la del hielo. La ecuación propuesta por Sahin (2000) se aplica para un intervalo de a -20 a 0 °C, y explica el comportamiento de la escarcha en función a la temperatura de la misma. Sin embargo cuando la temperatura de la escarcha es cercana a 0 °C, el valor de conductividad térmica es muy bajo, por tanto, el comportamiento térmico se ajusta mejor a la ecuación de Kim *et al.*, (2009), debido a que se considera el factor del cambio de porosidad, la conductividad térmica del aire y la densidad de la escarcha; mientras que Sahin (2000), sólo tomó la densidad de la escarcha, el cual depende directamente de su temperatura. Lo anterior demuestra que aun falta investigar en ésta área, ya que las propiedades termofísicas no dependen únicamente de una variable como la temperatura de escarcha; en el caso de la conductividad térmica no sólo depende de la densidad sino también de otros factores como número de Reynolds, humedad del aire y forma de los cristales de hielo (Sahin, 2000).

Para resumir, durante el periodo de formación de escarcha de hielo, con base en lo expuesto por Lee y Ro (2005) las propiedades termofísicas se comportan de la siguiente manera:

a) Densidad ↓ Conductividad térmica ↓ Porosidad ↑ Espesor ↑

Y durante el periodo de consolidación y transición de fase que fue el que se analizó para este trabajo de investigación, el comportamiento de las propiedades es inverso, el cual se muestra a continuación:

b) Densidad ↑ Conductividad térmica ↑ Porosidad ↓ Espesor ↓

Los resultados obtenidos concuerdan con lo propuesto por Lee y Ro (2005). Esto es importante porque la hipótesis de esta investigación fue que a mayor espesor de escarcha, se presenta mayor resistencia a la transferencia de calor durante la descongelación de carne; después de lo analizado, puede decirse que para la etapa de formación de escarcha esto se cumple, sin embargo ocurre lo opuesto durante la transición de fase, puesto que disminuyó el espesor, además la conductividad térmica aumentó de 0.3 a 2.2 W/mK, debido al fenómeno de densificación de escarcha.

3.4 Efecto de congelación criogénica y estabilización en cámara

Para este objetivo se evaluó la influencia de la congelación con nitrógeno sobre los cortes de lomo de cerdo y posteriormente durante su estabilización, es decir, el efecto del almacenamiento de los mismos en una cámara frigorífica a -20 °C a diferentes tiempos.

3.4.1 Forma de los cristales de hielo

La escarcha que se formó después de la congelación criogénica es diferente a la escarcha que se formó mediante en la cámara de congelación. La primera presentó una estructura ordenada en forma de dendritas, como las “ramas de un árbol”, como se observa en la figura 37 a); mientras que en la figura 37 b) se muestra la carne sometida a congelación criogénica y

almacenada en cámara de congelación, donde la escarcha posee una estructura similar a “agujas”.

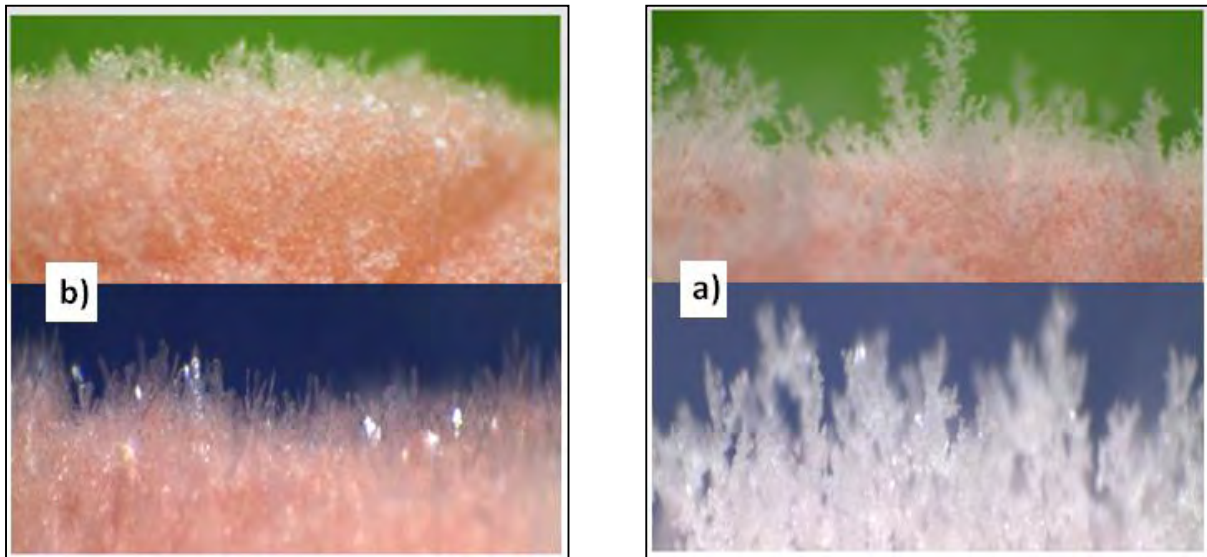


Figura 37. a) Cristales de hielo formados por congelación criogénica.

b) Cristales de hielo formados en cámara.

La diferencia en la forma de los cristales, se debió principalmente a que la escarcha obtenida mediante congelación criogénica, se encontró a una temperatura más baja (-35°C) que la formada mediante congelación criogénica seguida del periodo de estabilización en cámara (-18.3°C). Esto se explica dado que la temperatura de la cámara de congelación fue de -20°C , la cual fue mayor a la temperatura obtenida mediante congelación criogénica, por lo tanto el almacenamiento en cámara representó una pérdida en la cadena de frío de los cortes de carne. Esta evaluación fue de manera visual, debido a que no se cuenta con bibliografía específica acerca de la formación de cristales de hielo en alimentos, ni en las condiciones de humedad relativa que se trabajaron (20%), dado que Qu *et al.* (2006) y Sahin (2000) utilizaron condiciones de sobresaturación de humedad. Sin embargo, la forma de los cristales es influida principalmente por la humedad relativa y por la temperatura del cristal (Qu *et al.*, 2006).

Con base en los resultados de Sahin (2000), la forma del cristal depende de la temperatura a la cual éste se forme. Con esto queda demostrado, que el método de congelación y la temperatura del medio, influyen significativamente en la forma de los cristales de hielo.

3.4.2 Comparación de propiedades termofísicas de escarcha

En las siguientes gráficas se muestran los resultados de las diferentes propiedades termofísicas de la escarcha, esto se hizo con el fin de comparar las obtenidas durante la congelación criogénica y aquellas evaluadas en el periodo de estabilización en cámara de congelación, con las mismas ecuaciones. Se realizó usando solo los resultados para 30 minutos de congelación criogénica porque al usar los demás tiempos de congelación (60 y 90 min) las gráficas no tuvieron diferencias significativas.

3.4.2.1 Porosidad de escarcha

En el caso de la porosidad en la figura 38 se observan los datos obtenidos con la ecuación de Kim *et al.* (2009), la escarcha formada con nitrógeno líquido fue más porosa que la que se formó por congelación con cámara.

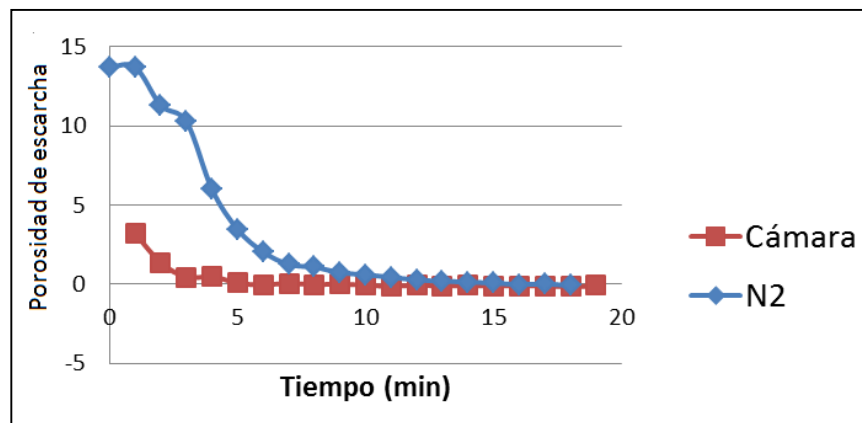


Figura 38. Comparación de porosidad con nitrógeno y cámara.

Cabe mencionar que éstos fueron los resultados esperados para dicha propiedad, este comportamiento se debió a que la temperatura de la escarcha formada con nitrógeno fue menor que la de cámara (Kim *et al.*, 2009)

3.4.2.2 Densidad de escarcha

Para comparar la densidad de escarcha se utilizó la ecuación de Sahin (2000) de la tabla 4, dado que las ecuaciones de predicción dependen principalmente de la temperatura, sólo se compararon los dos diferentes tratamientos de congelación (figura 39).

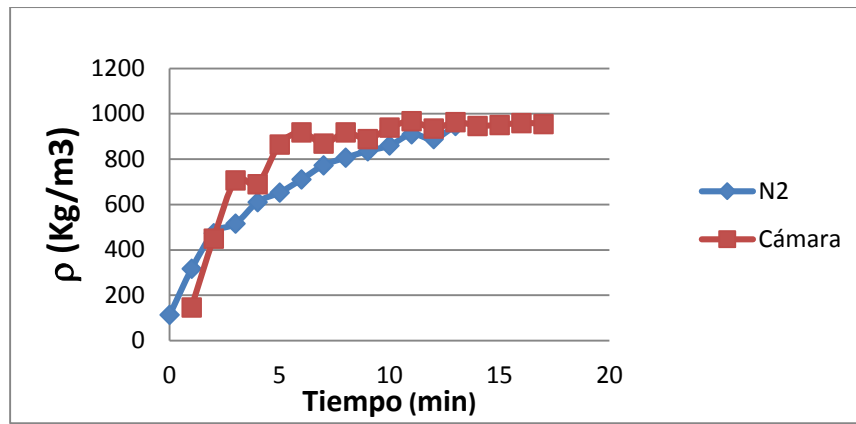


Figura 39. Comparación de densidad con nitrógeno y cámara.

Los resultados muestran que la escarcha formada en cámara de congelación fue de hasta 10 veces menos porosa durante los primeros 5 minutos en la fase formación y consolidación de escarcha, por lo tanto, la densidad de la escarcha con cámara fue 7% mayor en comparación con nitrógeno líquido

3.4.2.3 Conductividad térmica de escarcha

La conductividad térmica se comporta de manera similar a la densidad, para la primera se obtuvieron valores que fueron desde 0.15 a 0.9 W/mK utilizando la ecuación de Sahin (2000). El valor de la conductividad tiende a estabilizarse dado que se llegó a 0 °C para la conductividad térmica de escarcha formada en cámara, mientras que con nitrógeno la conductividad escarcha fue menor dado a que esta se encontraba a una menor temperatura que 0 °C.

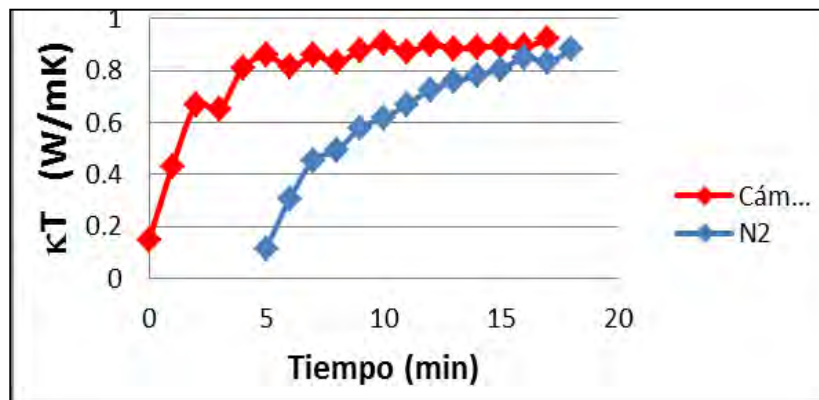


Figura 40. Comparación de conductividad térmica en congelación con nitrógeno y cámara (Sahin, 2000).

Esto comprueba la hipótesis acerca de que la escarcha con nitrógeno tiene menor conductividad térmica (figura 10). De acuerdo al ANOVA para los distintos tratamientos en cámara de congelación el valor de P es cero, es decir se tienen diferencias altamente significativas entre los mismos. Se obtuvo un valor de $F=78.66$ para el tiempo de congelación con cámara, por tanto esta fue la variable que tuvo un mayor efecto en el espesor de escarcha, seguida de la humedad relativa.

Para los valores medios de humedad relativa, de la figura 41, puede ser notado que conforme se aumentó el tiempo de almacenamiento dentro de la cámara de congelación, el espesor de la misma fue disminuyendo, esto pudo haberse debido a que la escarcha fue evaporándose dentro de la cámara de de congelación.

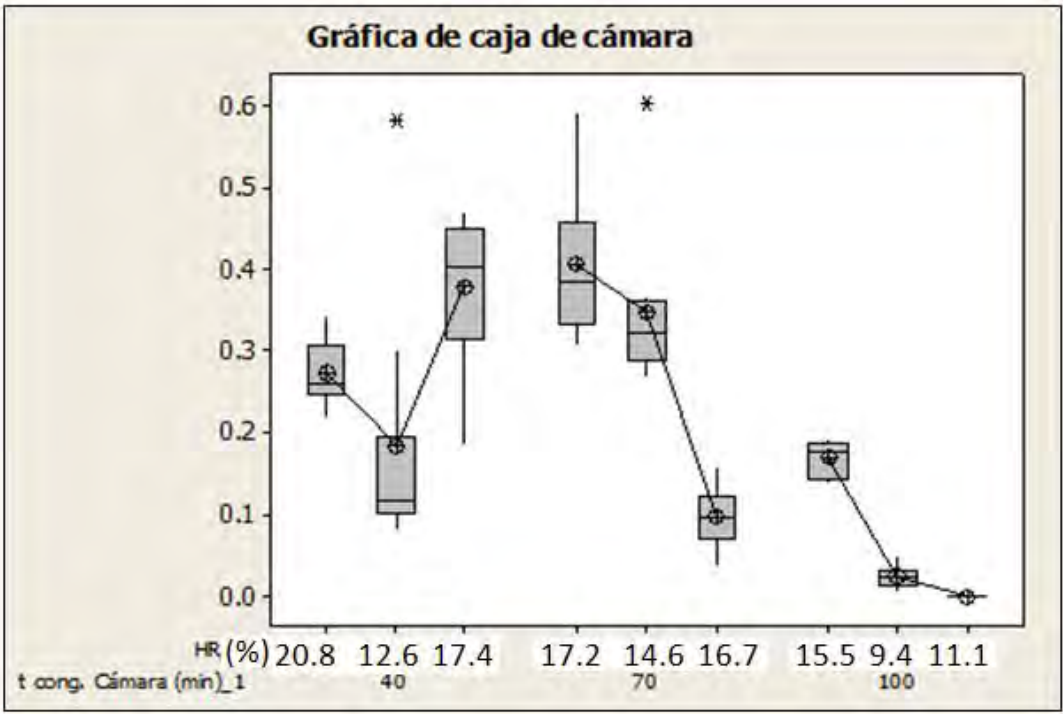


Figura 41. Gráfica de caja para congelación con cámara.

3.5 Efecto de apertura y cierre de puerta en cámara de congelación

Para cumplir el tercer objetivo se evaluó el efecto de la apertura y cierre de puerta en la cámara de congelación.

En la tabla 8, se muestra el monitoreo que se realizó al efectuar dicha apertura y cierre, así como las condiciones que se trabajaron, las aperturas tuvieron una duración de 1 minuto. La primera apertura se realizó a los 15 minutos de congelación en cámara, la segunda a los 45 minutos y la última a los 76, es decir éstas se realizaron cada 30 minutos aproximadamente y se muestran en los reglones de color azul claro. Así mismo, se muestra el cambio las condiciones del aire y la temperatura de la cámara de congelación.

Tabla 8. *Monitoreo de apertura y cierre de puerta en cámara de congelación.*

Apertura y cierre de puerta	tiempo (min)	Temp. aire (°C)	HR (%)	Temp. interna cámara (°C)
	0	-15	48	-25
	14	-16	48	-20
*	15	-20	50	-10
	30	-17	84	-25
	44	-21	78	-26
*	45	-21	78	-10.2
	57	-18	78	-24
	60	-18	78	-24
	72	-21	83	-26
*	76	-21	83	-11.9
	85	-17	90	-21
	90	-17	90	-23
	100	-20	89	-23

En este sentido, en la figura 42 se observa el evidente aumento de la temperatura de la cámara de congelación al efectuar la apertura y cierre de la misma, dado que se tuvo un gradiente de temperatura de 15 °C por cada apertura, conforme se realizaron las tres aperturas y cierres de puerta de la misma. La temperatura del aire y de la cámara de congelación, fueron distintas, dado que mientras la puerta de la cámara permanecía abierta se llevaba a cabo una mezcla de

corrientes entre el aire del interior y exterior de la cámara, los cuales tenían que llegar al equilibrio termodinámico.

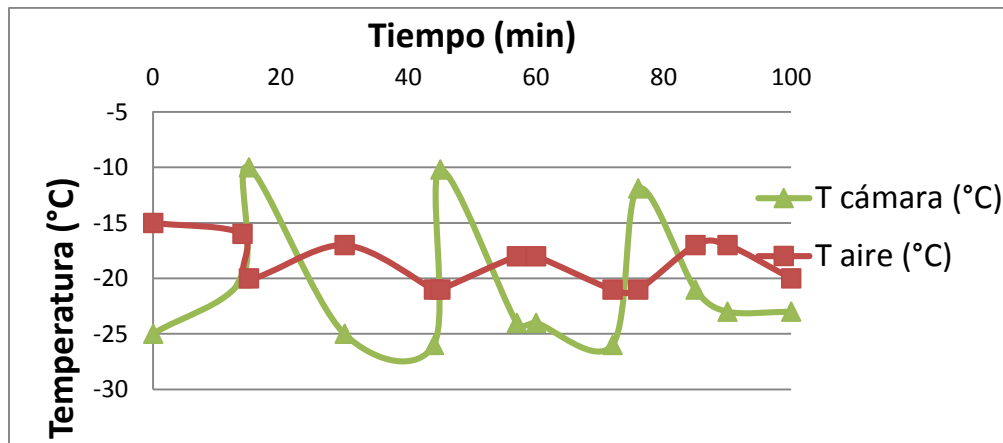


Figura 42. Comportamiento de temperaturas dentro cámara.

Además también se aumentó la humedad relativa dentro de la cámara. Este aumento es debido a que a temperaturas por debajo de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, las líneas de humedad relativa en la carta psicrométrica se encuentran muy cerca una de la otra, es decir con pequeños cambios en la temperatura fácilmente puede alcanzarse la saturación. Durante el minuto que se abría la puerta la temperatura de la cámara aumentó hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, después de esto la temperatura descendía a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante este descenso se aumentó la humedad relativa de la cámara por el aire que ingresaba a la cámara (Himmelblau, 2002).



Figura 43. Réplica de carne congelada sin escarcha.

De acuerdo al ANOVA, el valor de P también fue cero y el valor de F más alto fue para el tiempo de congelación con cámara, por tanto, éste fue el factor que más influyó. Es importante mencionar que en dos réplicas no se formó de escarcha, tal como se muestra en la figura 43, en la primera réplica fue para congelación en cámara y el segundo para apertura y cierre, el cual se observa en la figura 44 para 100 minutos en cámara y con humedad relativa baja (12%).

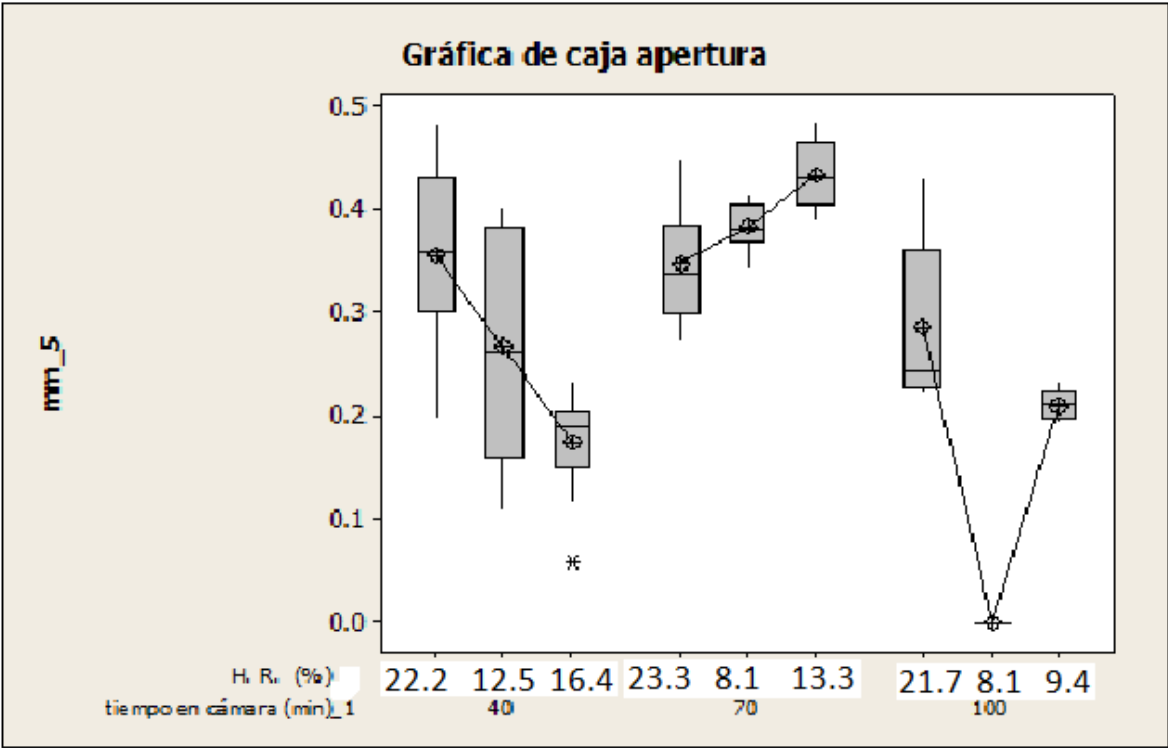


Figura 44. Gráfica de caja para apertura y cierre de puerta de cámara.

En el primer caso se tiene tuvo una baja humedad relativa 11.1%, mientras que para el segundo caso posiblemente puede explicarse debido al efecto de la baja humedad relativa de 8.1% y además de los incrementos de temperatura que fueron proporcionados con las “aperturas y cierres” los cuales, posiblemente derritieron la escarcha que se había formado sobre la superficie de las muestras de carne. Con esto se corrobora nuevamente la importancia el efecto de la humedad relativa sobre el espesor de la escarcha, ésta al ser baja no aumentó el espesor de escarcha. En ambos casos no había escarcha, esto se obtuvo con el mayor tiempo de permanencia en cámara.

Finalmente, para contrastar los tres diferentes tratamientos congelación criogénica, congelación con cámara y apertura y cierre de puerta vs. espesor de escarcha, se obtuvo que tanto existen diferencias significativas entre los tratamientos, así también el espesor de escarcha formado con nitrógeno líquido fue el que mostró mayor diferencia con respecto a los demás tratamientos, es decir, menor cantidad de escarcha. El fenómeno de formación de escarcha es distinto según el tratamiento que se aplique, en la figura 45 se advierte que el espesor de escarcha con nitrógeno líquido fue el valor más alto (0.67cm), en comparación con cámara y apertura de cierre y puerta, con esto se demuestra que a menor temperatura se obtuvo mayor espesor de escarcha.

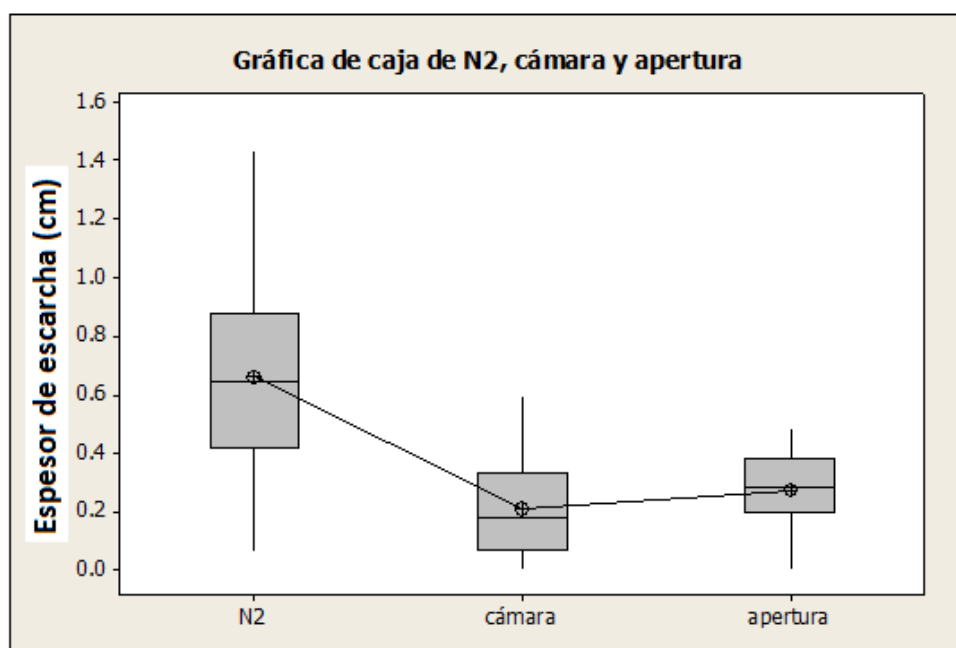


Figura 45. Gráfica de caja comparativa de distintos tipos de congelación.

En este estudio se evaluó el comportamiento de la formación de escarcha, así como de las propiedades termofísicas de la misma (espesor, densidad, conductividad térmica y porosidad) durante la descongelación de carne porcina sometida a distintos tratamientos los cuales fueron: congelación criogénica, congelación con cámara y variaciones de humedad relativa. Mediante el análisis de varianza se determinó que éstas afectan el fenómeno de formación-fusión de escarcha y las propiedades de la misma, lo cual nos indica que la escarcha formada mediante congelación criogénica tiene propiedades termofísicas distintas en comparación con los demás tratamientos de congelación.

CONCLUSIONES

- Para el caso de congelación con nitrógeno líquido, se alcanzó una temperatura superficial de $-35\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ (promediada a partir de 6 réplicas) en los cortes de carne, con la cual se obtuvo un mayor espesor de escarcha (0.67 cm) en comparación la formada en cámara de congelación.
- La humedad relativa fue una variable que influyó significativamente, puesto que conforme ésta aumentó, dio como resultado un mayor espesor de escarcha.
- En lo referente al comportamiento de las propiedades termofísicas, durante el aumento de temperatura (en descongelación) la porosidad disminuye, mientras que la densidad y la conductividad térmica aumentan dado que los poros de la escarcha se saturan de agua, de esta manera se encuentran más próximas las moléculas de agua.
- La escarcha formada mediante congelación criogénica dio como resultado cristales con forma dendrítica; por otro lado, al ser sometidos al almacenamiento en cámara, es decir a mayor temperatura, la forma de los cristales cambió a agujas, resultando evidente la diferencia entre los distintos tratamientos de congelación.
- Las propiedades de la escarcha sometida a cámara de congelación, en comparación con congelación criogénica fueron así: la porosidad fue menor, la densidad y la conductividad fueron mayores, debido a que las ecuaciones de predicción dependen en gran medida de la temperatura.
- Las aperturas representaron un aumento considerable en la temperatura de la cámara (15 °C), por lo que se recomienda mantener la cadena de frío, para evitar la recristalización de la escarcha sobre los alimentos.
- Actualmente la investigación acerca de la formación de escarcha en alimentos es incipiente, en virtud de la dificultad que representa crear un modelo donde se deben involucrar al mismo tiempo tres leyes fundamentales: cantidad de movimiento de Newton, transferencia de calor de Fourier y transferencia de masa de Fick. Por esto es que la mayoría de las investigaciones (en superficies metálicas) han estudiado la escarcha durante su etapa de formación más no durante la transición de fase. En este sentido, los resultados de este estudio adquieren importancia para la investigación de la escarcha.

BIBLIOGRAFÍA

- Askeland, D., (1987). *La ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Iberoamérica, México.
- Astiasarán, I. y Martínez, J. (2000). *Alimentos. Composición y propiedades*. Mc Graw Hill, Madrid España 1era Edición.
- ASHRAE (2002). *ASHRAE Handbook: Refrigeration*, SI Edition. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and air conditioning engineers, 15.1–15.6.
- Atkins, P. W., (1991). *Fisicoquímica*. Addison-Wesley Iberoamericana 3ra Edición. U.S.A.
- Agnelli, M. E., Mascheroni, Rodolfo H., (2001). Cryomechanical freezing. A model for the heat transfer process. *Journal of Food Engineering*, 47, 263-270.
- Campañone, L. A., Salvadori, V. O. y Mascheroni, R. H., (2001). Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods. *Journal of Food Engineering*, 47, 69-79.
- Carballo, B. y López de Torre, G. (2001). *Tecnología de la carne y de los productos cárnicos*. Editorial Mundi Prensa Madrid, España.
- Chen, C. S., (1987). Relation between water activity and freezing point depression of food systems. *Journal Food Science*. 52 (2): 433-435.
- Cheng, C.H., y Shiu, 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.
- Cheftel J. C., Cheftel H. (1976). *Introducción a la bioquímica de alimentos*. Ed Acribia, España.
- Delgado, A. E., y Sun, D., (2007). Influence of surface water activity on freezing/thawing times and weight loss prediction. *Journal of Food Engineering*, 83, 23-30.
- Emery, A.F., y Siegel B. L., (1990). Experimental measurements of the effects of frost formation on a heat exchanger performance. *Thermophysics and Heat Transfer Conference*, 139, 1-7.
- Erland M. Schulson, (2009). *Creep and Fracture of Ice*, Cambridge University Press.

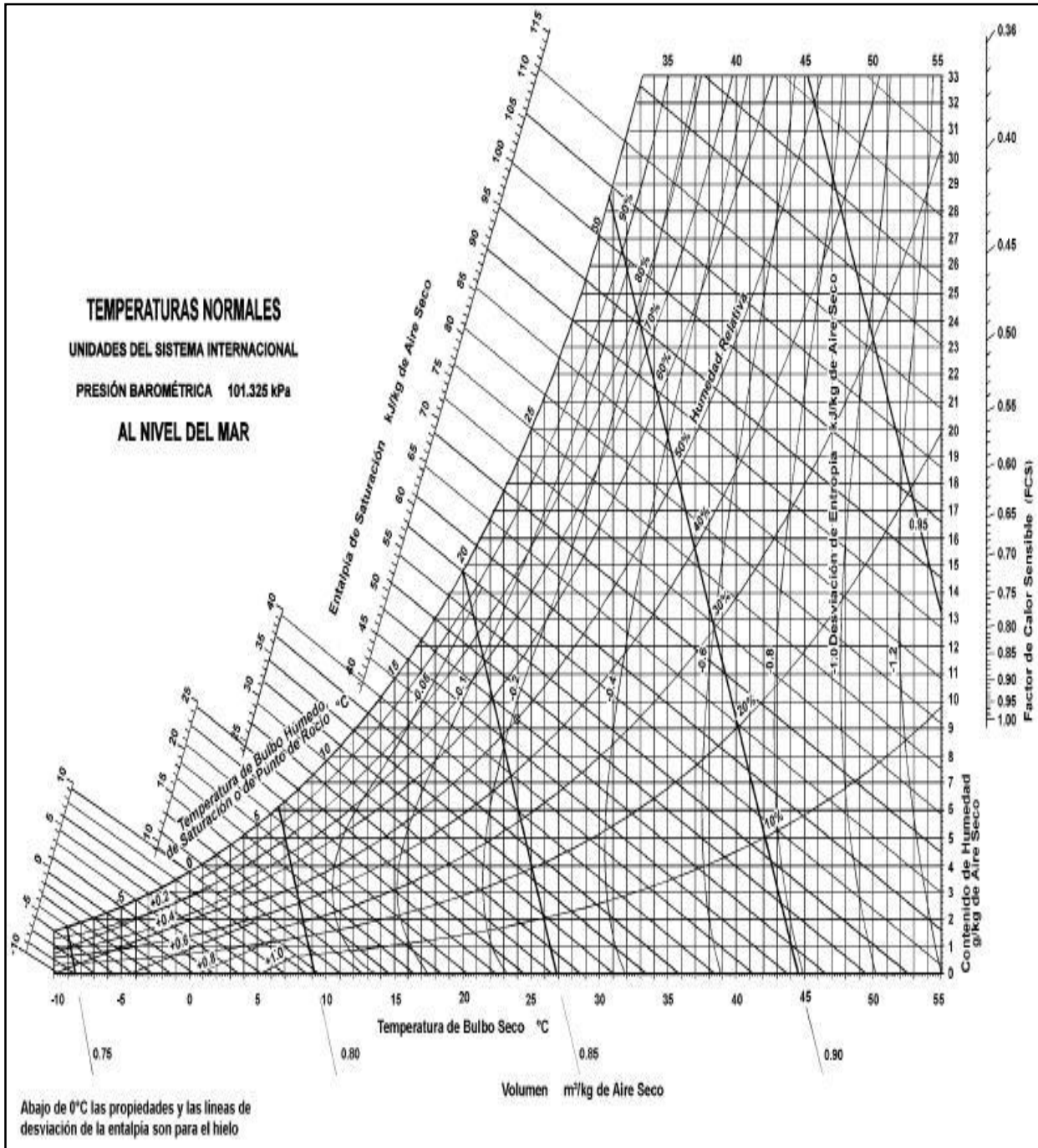
- Evans, J. A., (2008). *Frozen Food Science and Technology*. 1st Edition. Blackwell Publishing, Oxford U.K.
- Fellows, P. J., (2007). *Food Processing Technology. Principles and practice*. 3rd. Edition Woodhead Publishing, Cambridge England.
- García, D., (2007). *Instalaciones de refrigeración y aire acondicionado*. UOC Ediciones técnicas.
- Gatica, J. A., Pita, V. A., (2008). Correlación para factores que intervienen en el proceso de formación de escarcha. *8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Perú.
- Gatica, J. A., Pita, V. A., y Lobo N. de C., (2009). Simulación del depósito de escarcha en superficies frías. *Información Tecnológica*. 20(2), 113-126.
- Geankoplis, C. J., (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Editorial Continental, 3ra. Edición, México.
- Genot, C. (2003). *Congelación y calidad de la carne*. Editorial Acribia, Zaragoza España.
- Gigiél, A. y Creed, P. G. (1987). Effect of air speed, temperature and carcass weight on the cooling rates and weight losses of goat carcasses. *International Journal of Refrigeration*, 10, 305-306.
- Goswami, T. K. (2010). Role of cryogenics in food processing and preservation. *International Journal of Food Engineering*, 6, 1-29.
- Hartel, R., (2001). *Crystallization in Foods*. Maryland: Aspen Publishers Inc., 192–231.
- Hermes, C. J. L., Piucco, R. O., Barbosa Jr., J. R., Melo, C. (2009). A study of frost growth and densification on flat surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 371-379.
- Himmelblau, D. M. (2002). *Principio básicos y cálculos en ingeniería química*. 6^a Edición. Editorial Pearson Prentice-Hall México.
- Hoke, J., Georgiadis, J., Jacobi, M. (2000). *The interaction between the substrate and frost layer through condensate distribution*. Air Conditioning and Refrigeration Center. Thesis of University of Illinois.
- IIF Institut International du Froid, (1986). *Recommandations pour la préparation et la distribution des aliments congelés*. 3ra Edición, París, 418.

- Jafari, M. y Alavi, P., (2008). Effect of some parameters on freezing time of slab shaped foods under two impinging slot jets. *Journal of Applied Sciences*, 8(12): 2234-2241.
- Kim, K. H., Ko, H., Kim, K., Kim, Y. 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.
- Laguette, O. y Flick, D., (2007). Frost formation on frozen products preserved in domestic freezers. *Journal of Food Engineering*, 79, 124-136.
- Lawrie, R. A., (1991). *Meat Science*. Fifth Edition. Pergamon Press, Oxford, England.
- Lee, Y. B. y Ro, S.T., (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.
- Madrid, A. (2003). *Refrigeración, congelación y envasado de los alimentos*. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España.
- Mago, P. J. y Sherif, S. A., (2004). Frost formation and heat transfer on a cold surface in ice fog. *International Journal of Refrigeration*, 28, 538-546.
- Mason, B.J. (1971). *The Physics of Clouds*, 2nd ed, Clarendon Press, Oxford.
- Martins, R. C., Almeida, M. G., y Silva, C. L. M. (2005). The effect of home storage conditions and packaging materials on the quality of frozen green beans. *International Journal of Refrigeration*, 27, 850–861.
- Mannapperuma, J. D. y Singh, R. P. (1987). Thawing of frozen foods in humid air. *International Journal Refrigeration*, 11, 173-186.
- Melendez, R., Rosas, M. E., Mercado, R., Velázquez, R., Arjona, J. L., (2011). Comparison of melting frost layers after 2 frozen methods in pork cuts (*longissimus dorsi*). *11th International Congress on Engineering and Food*.
- Méndez, B. O., (1999). Weight loss during freezing and the storage of frozen meat. *Journal of Food Engineering*, 41, 1-11.
- Norma Mexicana NMX-FF-081-SCFI-2003, Productos pecuarios. Carne de porcino en canal. Calidad de la carne.
- Norma Oficial Mexicana NOM-009-ZOO-1994, Proceso sanitario de la carne.

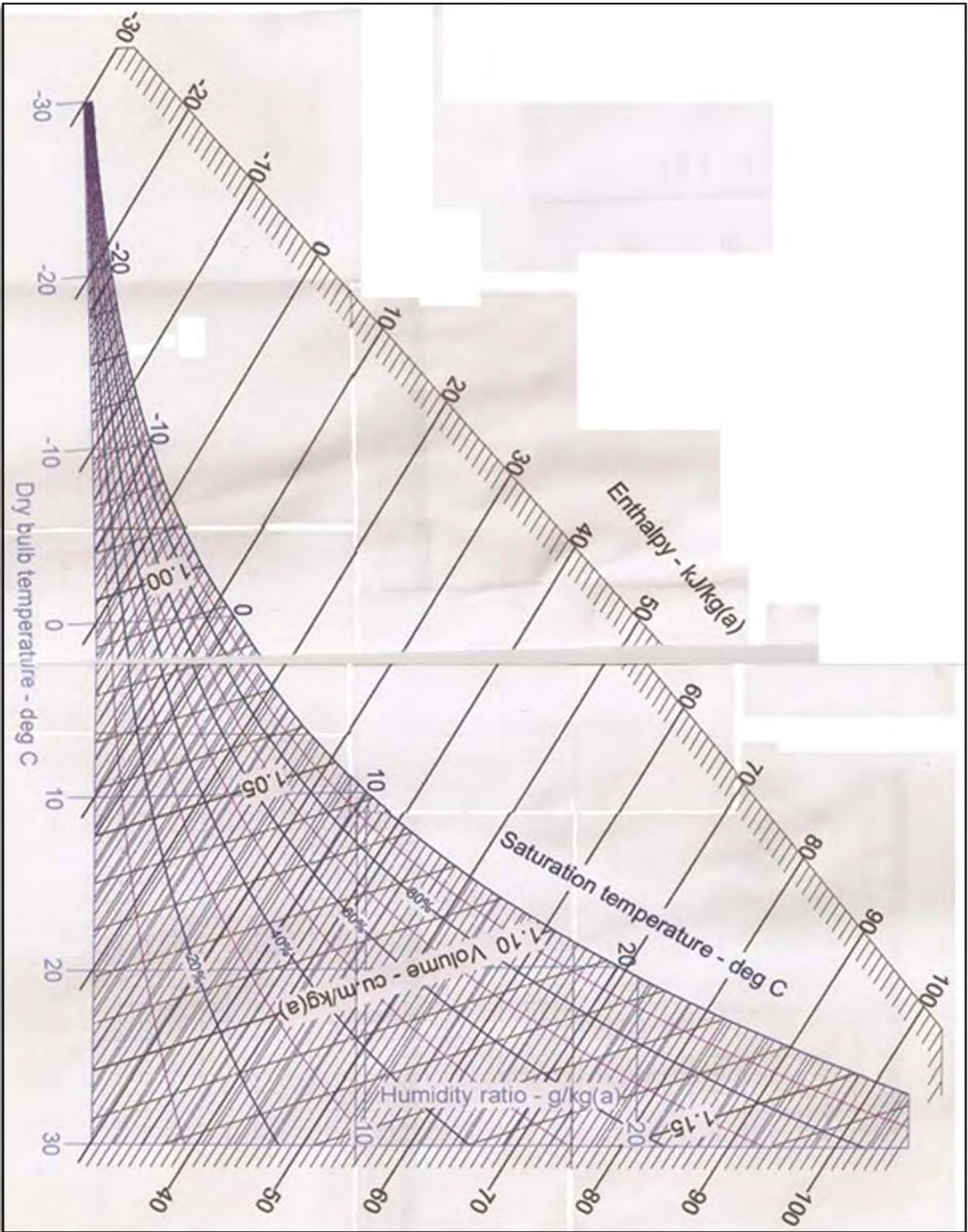
- Pardo, J. E., (1998). *La industria cárnica. El sistema de análisis de riesgo y control de puntos críticos*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 3ra Edición, España.
- Plank, R. (1980). *El empleo del frío en la industria de la alimentación*. Editorial Reverté, España.
- Poovarodom, N., Letang, G., Bouvier, J., Billiard, F., (1990). Influence de l'emballage et des fluctuations de temperature de conservation sur la qualité des dendrées alimentaires surgelées, IIF, Paris, Coll. Science et technique du froid. *In Progrès dans la science et la technique du froid en industrie alimentaire*, 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.
- Rahman, M. S., Guizani, N., Al-Khaseibi, M, Al-Hinai, S., Al-Maskri, S., Al.Hamhami, K. (2002). Analysis of cooling curve to determinate the end of point of freezing. *Food Hydrocolloids*, 16, 653-659.
- Ried, D., (1983). *Fundamental physicochemical aspects of freezing*. Food Technology.
- Sahin, A. Z., (2000). Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth period. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 539-553.
- Schmidt, S. J. y Lee, J. W., (2009). How does the freezer burn our food? *Journal of Food Science Education*, Freezer burn.
- Shirk S., Mulvaney, S., Rizvi S., (2003). *Ingeniería de alimentos. Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. Editorial Limusa, México.
- Solís, M., De Pedro, E., Garrido, A., García, J., Silió, L., Rodríguez, C., Rodrigáñez, J., (2000). *Evaluación de la composición del lomo de cerdo ibérico mediante la tecnología NIRS*, Madrid, España.
- Sun, D.W., (2006). *Handbook of frozen food processing and packaging*. 1st Edition. Published by CRC Group, Taylor & Francis Group, U.S.A.
- Tipler, P. & Mosca, G. (2003). *Physics for scientist and engineers*, fifth Edition, Edited by W. H. Freeman and company, New York, U.S.A.

- Wang, C., Huang, R., Sheu, W., Chang, Y., (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.
- Zaritzky, N., (2000). *Factors affecting the stability of frozen foods*. CJ Kennedy, Ed., Managing Frozen foods. Cambridge, England: CRC, Woodhead Publishing Limited. 111–133.
- Arteria, I. (2011). *Estructura del músculo estriado*. Obtenido de http://www.google.com.mx/search?hl=es&gs_rn=11&gs_ri=psy-
- Barreiro José A., Sandoval B. y Aleida J. (2006). *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas*. Editorial Equinoccio Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
- Carranza de La Torre, R., (2008). *Apuntes de Ingeniería de Alimentos*. Congelación de alimentos. Universidad Jorge Basadre Grohmann. Perú. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/6045887/Apuntes-de-Congelacion-de-Alimentos>
- Fecha de consulta: 28 de marzo del 2011.
- Emerson (2009). *Emerson Co. Climate México*. Obtenido de: www.emersonclimatemexico.com/mt/mt_cap_13.pdf
- Structure Probe, Inc (2011). *Termos Dewar®*. Obtenido de: <http://www.2spi.es/catalog/instruments/liquid-nitrogen-dewars.shtml>

Anexos



Anexo 1. Carta psicrométrica a nivel del mar (1 atmósfera) Carrier®.



Anexo 2. Carta psicrométrica para bajas temperaturas(585mmHg) Psychrometric®.