



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

APLICACIÓN DEL MODELO DE TEXTURA ESTADISTICA PARA LA
DETERMINACION DE LA FORMACION,
CRECIMIENTO Y FUSION DE ESCARCHA SOBRE EL LOMO DE
CERDO ALMACENADO A TEMPERATURAS DE CONGELACION.

T E S I S :

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

OMAR NIEVES CANO

ASESOR: M. en C. ROSALIA MELENDEZ PEREZ

COASESOR: Dr. JOSE LUIS ARJONA ROMAN



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

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

U. N. A. M.
ASUNTO: VOTO APROBATORIO
SUPERIORES CUAUTITLÁN



ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.
EXÁMENES PROFESIONALES

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

Aplicación del modelo de textura estadística para la determinación de la formación, crecimiento y fusión de escarcha sobre el lomo de cerdo almacenado a temperatura de congelación

Que presenta el pasante: Omar Nieves Cano

Con número de cuenta: 305081593 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 23 de abril de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en C. Rosalía Meléndez Pérez	
VOCAL	Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza	
SECRETARIO	IA. Edgar Francisco Arechavaleta Vázquez	
1er. SUPLENTE	M. en C. Víctor Manuel Avalos Ávila	
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).

HHA/pm

Una persona usualmente se convierte en aquello que él cree que es. Si la persona se dice así misma que no puede lograr realizar algo, terminara siendo incapaz de hacerlo. Por el contrario si tiene la creencia de poder hacerlo, con seguridad adquirirá la capacidad de realizarlo aunque no lo haya tenido desde un principio.

Gandhi

DEDICATORIAS

Dedico estos años de esfuerzo en especial a:

DIOS por darme la gracia de la vida.

A mi mama *Eva Cano Ramirez* por todo el amor y el apoyo que me brindaste durante todo los momentos de mi vida.

A mi papa *Baltazar Nieves Diaz* por toda la comprension y el apoyo que me brindaste en toda mii vida.

A mi hermano *Erick Nieves Cano* † por tener a un ser especial desde el cielo cuidandome y por el gusto de tener en su momento a un hermano como tu.

A mi hermanito *Kevin Axel Nieves Cano* por ser el nuevo integrante de la familia y por brindarme esas alegrias unicas y especiales de un niño como tu.

A la mejor familia que pude tener y que pasamos momentos inolvidables les dedico este logro pues no es solo mio, es de todos LOS AMO.

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS**: Por permitirme lograr una de tantas metas en mi vida y por estar siempre acompañándome en todos los momentos de esta y todas las etapas por vivir.

A **MIS PADRES BALTAZAR NIEVES Y EVA CANO**: Por darme la fortaleza necesaria y el apoyo incondicional sobre esta etapa de mi vida, por su comprensión y apego al realizar esta meta junto a mí, les agradezco de todo corazón su compañía los amo.

A **MI HERMANO ERICK†**: Por ser el ser que más me cuida desde el cielo y por tener la dicha de haber pasado momentos de felicidad junto a ti sabes que te amo y que un día de estos festejaremos juntos nuestros logros te extraño mucho mi hermanito gracias.

A **MI HERMANO KEVIN**: Por tus travesuras que no me dejaban estudiar, y por todo lo que me haces enojar sabes bien que te amo y que espero un día ver que lees esto con orgullo por qué es lo que yo espero de ti así que aplícate que sabes que soy tu apoyo incondicional.

A **LA UNAM**: Por dejarme cursas y formarme académicamente en la mejor escuela que pude haber tenido.

A **M. en C. ROSALIA MELENDEZ PEREZ**: Agradezco el gusto que tengo en conocer a una persona tan humana, por todo el apoyo que me brindo, sus enseñanzas no solo abarcaron el lado estudiantil si no también el lado de la amistad, doy gracias a dios a que tuve la mejor asesora de toda la facultad y poder decir con orgullo mi asesor fue la maestra Rosalía la quiero mucho profesora gracias.

A **Dr. JOSE LUIS ARJONA ROMAN**: Por tanto conocimiento y carácter que pude aprender de usted, conocer a una persona con ese intelecto como el que tiene no cualquier persona, pero que sea mi asesor abarca mucho más que eso, después de tanta pendejeada lo he logrado y gracias a usted profe.

A **Dr. MARTA ELVIA ROSAS MENDOZA**: Gracias profesora por el apoyo y el conocimiento que me proporciono, la tesis sin usted no se hubiese logrado, con ese carisma que le caracteriza, me hizo sentir muy feliz la última prueba de la escuela, y doy gracias que me permitió conocer un poco de su enseñanza y lo prometido es deuda aquí está el agradecimiento que se merece de todo corazón para usted, la quiero mucho profesora.

A **JOSUE MISAEL FLORES BENITEZ**: Te agradezco de todo corazón tu apoyo tu comprensión y todos los momentos que pasamos juntos en esta etapa, fuiste un pilar en el cual yo pude sostenerme y apegarme eres una persona a la cual le debo mucho y sin importar lo que sea sabes que cuentas conmigo te quiero mucho.

A **HAYDEE ARIADNA CAMARGO GARCIA**: Llegaste a ser una gran amiga ¿donde estabas en los primeros semestres?, que no vez que tu apoyo y tus consejos son importantísimos para mí y tú que no estabas, pero te agradezco que llegaste en el momento más preciso de mi vida, eres la más amiga una persona que brinda todo su amor incondicionalmente sabes que de mi parte tienes a alguien que te apoyara en cada momento de tu vida y que siempre estará ahí, te agradezco mujer por estar junto a mí siempre, sabes que TAHCG jajajaja te quiero muchísimo.

A **ISRAEL NAVARRO LIMON (PICHI)**: Los pensamientos de madurez y filosofía (Esta vida me encanta) son más reales en la uni, pero lo más chingon es haberlos pensado contigo eres una persona en la cual yo encontré un amigo de escuela, de fiesta, de lamentos, de llantos, de alegrías y lo más importante de corazón te quiero un buen nunca cambies carnalito.

A **FERNANDO VELEZ VEGA**: Porque aparte de ser mi guardaespaldas también eres mi ángel de la guarda, tu amistad es muy valiosa para mí, tu sencillez y nobleza te hacen ser una persona muy especial sabes que te quiero mucho y que el día de mañana seremos dos ingenieros con el orgullo de saber que tenemos a los mejores amigos gracias.

A **ROSA LUZ RAMIREZ MARTINEZ**: A mi amor por todos los momentos de felicidad y todo el apoyo que me brindaste eres una de mis mejores amigas sabes que te quiero mucho y que siempre estaremos juntos en las buenas y en las malas mujer sabes que eres muy especial para mi.

A **KAREN NAJAR, YOSA Y LILIANA**: Mis primeras conocidas en la facultad mis primeras amigas, saben que las quiero mucho y les agradezco que hayan formado y que seguirán siendo parte de mi vida, en especial tu Pacha sabes que te quiero mucho y que cuentas conmigo para lo que necesites y a las otras dos espero volverlas a ver siendo triunfadoras.

A **URIEL HDZ Y ROBERTO CRUZ**: En tan poco tiempo que tengo de conocerlos me brindaron su nobleza y carisma y me hicieron recordar momentos que había olvidado, los quiero un buen y saben que los considero seres especiales en mi vida, que con un gusto digo que son mis amigos nuevos que conozco y seguiré conociendo por mucho tiempo, los quiero un buen y espero triunfen en todo.

A **LULU (SHINKU) Y LAUS**: Son mujeres de mi vida de las más queridas que he tenido con diferentes actitudes pero el mismo valor, las quiero mucho y les agradezco que sean parte de esta etapa pues tantas risas y lamentaciones que vivimos juntos no se comparan con ninguna vivencia.

A **KARINA Y FRIDA**: El mejor equipo que pude haber tenido son especialmente unas niñas tan queridas y tan inteligentes que agradezco que sean parte de mi carrera y de mi amistad las quiero mucho.

A **PAULINA, ELIANE (AMORS), TRIBI**: Por darme la oportunidad de conocerlos y pasar momentos de alegría con ustedes.

INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
1. OBJETIVOS	4
1.1 Objetivo General	4
1.2 Objetivo Particular 1	4
1.3 Objetivo Particular 2	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1 Marco comercial de la carne	5
2.2 Generalidades de la carne	7
2.3 Congelación de la carne	12
2.4 Escarcha	18
2.5 Difusividad de sólidos porosos	19
2.6 Propiedades termo físicas de la escarcha	24
2.7 Análisis de textura de imagen	29
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	33
3.1 Cuadro Metodológico	33
3.2 Descripción de metodología experimental	34
3.2.1 Planteamiento del problema	34
3.2.2 Objetivo General	34
3.2.3 Actividades Preliminares	34
3.2.3.1 Actividad Preliminar 1	34
3.2.3.2 Actividad Preliminar 2	35
3.2.3.3 Actividad Preliminar 3	37
3.2.4 Objetivo Particular 1	38
3.2.4.1 Hipótesis 1	39
3.2.5 Objetivo Particular 2	40
3.2.5.1 Hipótesis 2	40
ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Exportación de carne porcina	7
Tabla 2. Composición química de lomo de cerdo (<i>Longissimus Dorsi</i>).	9
Tabla 3. Combinación de luces y condiciones	36
Tabla 4. Condiciones de prueba toma fotográfica (digital)	44
Tabla 5. Condiciones de toma fotográfica (grado de abertura)	47
Tabla 6. Selección del grado de abertura	47
Tabla 7. Condiciones de toma fotográfica (microscopio)	48
Tabla 8. Condiciones de toma fotográfica microscopio final	50
Tabla 9. Valores del coeficiente de difusión efectiva en el proceso de escarchado	52
Tabla 10. Condiciones de toma fotográfica (15 días de almacenamiento)	53
Tabla 11. Condiciones de toma fotográfica (30 días de almacenamiento)	56
Tabla 12. Condiciones de prueba toma de temperaturas 15 y 30 días almacenamiento	62

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de los diversos productos alimenticios	5
Figura 2. Consumo de carne per cápita mundial	5
Figura 3. Principales productores de carne porcina	6
Figura 4. Soporte y organización de las fibrillas de la carne	8
Figura 5. Estructura de las fibrillas de la carne	
Figura 6. Curva de congelación (a) agua, (b) A congelación lenta, B congelación rápida	13
Figura 7. Energía libre en función a la temperatura	14
Figura 8. Distintas formas de hielo en función a la temperatura	16
Figura 9. Difusión molecular en un sistema poroso	21
Figura 10. Difusión tipo Knudsen	21
Figura 11. Difusión superficial	22
Figura 12. Estados de agregación de la materia	24

Figura 13. Diagrama de fases P vs T	25
Figura 14. Elaboración de la matriz de co-ocurrencia	31
Figura 15. Vecinos del pixel de referencia X	31
Figura 16. Acondicionamiento del montaje fotográfico	35
Figura 17. Posición de luces en cámara microscópica	36
Figura 18. Acondicionamiento de luz para toma fotográfica	43
Figura 19. Cambios en la rugosidad de imagen (SOS)	44
Figura 20. Cambios en el orden de imagen (ET)	45
Figura 21. Cambios en la uniformidad de imagen (ASM)	45
Figura 22. Selección del grado de abertura	46
Figura 23. Diferencia de valores individuales en rugosidad de imagen (SOS)	49
Figura 24. Diferencia de valores individuales en orden de imagen (ET)	49
Figura 25. Diferencia de valores individuales en uniformidad de imagen (ASM)	50
Figura 26. Velocidad de formación, crecimiento y fusión de escarcha	51
Figura 27. Entropía estadística respecto al tiempo 15 días de almacenamiento	54
Figura 28. Formación del cristal. A cámara digital, B cámara microscópica	55
Figura 29. Periodo de crecimiento de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica	55
Figura 30. Periodo de crecimiento y fusión de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica	56
Figura 31. Entropía estadística respecto al tiempo 30 días de almacenamiento	57
Figura 32. Formación del cristal. A cámara digital, B cámara microscópica	58
Figura 33. Periodo de crecimiento de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica	58
Figura 34. Periodo de crecimiento y fusión de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica	59
Figura 35. Comparación de entropía estadística (15 y 30 días de almacenamiento)	59
Figura 36. Toma fotográfica (cámara digital)	60
Figura 37. Toma fotográfica (cámara microscópica)	61
Figura 38. Zonas de registro de temperaturas	62
Figura 39. Calor específico (C_p) durante el proceso de escarchado (a) 15 días	63

(b) 30 días de almacenamiento.

Figura 40. Energía de activación para 15 días de almacenamiento 64

Figura 41. Energía de activación para 30 días de almacenamiento 65

Figura 42. Entropía termodinámica 15 y 30 días de almacenamiento 66



RESUMEN

El siguiente proyecto se realizó en el taller multidisciplinario “Ingeniería de Proceso de Separación por Transferencia de Masa” de la carrera Ingeniería en Alimentos que se imparte en la Unidad de Investigación Multidisciplinaria en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán campus 4.

Este taller examina la relación que tiene la transferencia de calor con la transferencia de masa y su importancia en el procesamiento y almacenamiento de los alimentos.

La carne es un alimento altamente susceptible de sufrir diversos procesos de deterioro que se presentan durante el almacenamiento, procesamiento y comercialización; en este trabajo se aplicó el modelo de “textura estadística” para la determinación de la velocidad de la formación, crecimiento y fusión de la escarcha sobre la superficie y observar el cambio en la apariencia física sobre el lomo de cerdo (*Longissimus Dorsi*).

Además encontrar una relación análoga entre los cambios existentes en la textura de imagen y la forma en que las propiedades de la materia son modificadas por los cambios de temperaturas mediante la determinación de “entropía estadística” con respecto a la “entropía termodinámica”.

Satisfactoriamente se obtuvo una relación análoga entre entropía estadística y entropía termodinámica ya que se obtuvieron claramente los tres periodos de escarchado (formación del cristal, crecimiento de escarcha y fusión de escarcha) tanto en la evaluación de textura estadística y propiedades termofísicas.



INTRODUCCIÓN

Considerando que la mayoría de los alimentos de origen agrícola o pecuario se deterioran, surge la necesidad de desarrollar técnicas de conservación y procesamiento que faciliten el traslado de productos, especialmente de aquellos perecederos como lo es la carne.

El valor nutritivo de la carne, radica en que es fuente de aminoácidos esenciales, vitaminas del complejo B y hierro entre otros nutrientes; sin embargo, el valor de la carne se determina no solo por sus cualidades nutritivas sino también por sus propiedades organolépticas, tales como: color, sabor, textura y dureza, etc.

El lomo de cerdo es un material biológico que contiene una gran variedad de sustancias entre ellas se encuentra el agua. La congelación de este material induce a cambios morfológicos, a la destrucción de células, así como a la distorsión de las fibras, degradando el material y en consecuencia cambiando la textura y cantidad de exudados después de su descongelación.

La calidad de la carne se deteriora aun a muy bajas temperaturas, por lo que su vida de anaquel de esta siempre tiene un límite. Conforme va aumentando el tiempo de almacenamiento congelado, la textura de la carne cambia. La parte grasa comienza a degradarse, se torna granulosa y quebradiza y la parte magra se decolora.

Sin embargo; no sólo el proceso de congelación daña al alimento, también se tienen daño superficial al principio de la descongelación por la formación de escarcha. Durante el almacenamiento en congelación, los cristales de hielo son relativamente inestables y experimentan cambios en el número, tamaño y forma. En el momento de la descongelación se genera el crecimiento de capas de hielo conocidas como escarcha, esto se produce a partir de la frontera del sistema hacia los exteriores donde predomina más el gradiente térmico, y por lo tanto se efectúa un daño en la superficie del alimento.



Puesto que además de tener un daño textural en el alimento también es un problema en el proceso operativo de la congelación, ya que la difusividad molecular (D_{AB}) del vapor en el aire no gobierna el proceso difusivo dado que el hielo ofrece una resistencia a la difusión.

Existen numerosas técnicas de evaluación de la calidad y textura de los alimentos. En los últimos años se ha involucrado una nueva técnica para evaluar ese daño textural mediante la toma de imágenes, de las que se obtiene su pixelación para realizar un análisis estadístico.

El análisis de textura de imagen permite conocer el daño causado por el proceso de la formación de escarcha en el lomo de cerdo a través de la toma fotográfica, generalmente haciendo referencia a las propiedades de imagen: Segundo Momento Angular (ASM) que indica la uniformidad de la imagen, Suma de Cuadrados (SOS) que representa la rugosidad y por último la Entropía estadística (ET) que nos dice el orden de pixelación en la imagen. Estas características texturales se basan en una matriz de co-ocurrencia.

La razón principal de este estudio fue verificar si el daño textural, evaluado mediante la toma de imágenes, tienen relación con los cambios energéticos y difusionales que ocurren durante la formación, crecimiento y fusión de la escarcha sobre la superficie de la carne.



1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el cambio en la textura estadística y en las propiedades termofísicas durante la formación, crecimiento y fusión de escarcha mediante una matriz de co-ocurrencia y el registro de temperaturas en el lomo de cerdo (*Longissimus Dorsi*) almacenado a dos diferentes intervalos de tiempo a temperaturas de congelación para relacionarlo con el coeficiente de difusión.

1.2 OBJETIVO PARTICULAR 1

Determinar a través de una matriz de co-ocurrencia en macro y microfotografía la formación, crecimiento y fusión de escarcha en lomo de cerdo a bajas temperaturas (-27°C) almacenado durante intervalos de tiempo de 15 y 30 días para obtener los cambios en la textura estadística.

1.2 OBJETIVO PARTICULAR 2

Evaluar las propiedades termofísicas a través del registro de temperaturas en la superficie del lomo de cerdo almacenado a -27°C durante intervalos de tiempo de 15 y 30 días para determinar el valor de entropía termodinámica y la relación con el coeficiente de difusión.



2. ANTECEDENTES

2.1 MARCO COMERCIAL DE LA CARNE

El consumo de productos de origen animal en la dieta humana ha evolucionado en los últimos años como se muestra en la figura 1, donde incrementa de un 15,3% hasta un 17,7% en un periodo de 50 años. (Desouzart, 2011)



FIGURA 1. Consumo de los diversos productos alimenticios (Desouzart, 2011).

La carne porcina incrementó de un 8,03% hasta un 15,05% del consumo per cápita, logrando un aumento del 87,2%, quedando por debajo del consumo de carne de aves que tuvo un incremento del 339,7% y por arriba de la carne vacuna que obtuvo un 2,9% del consumo per cápita, como se muestra en la figura 2.

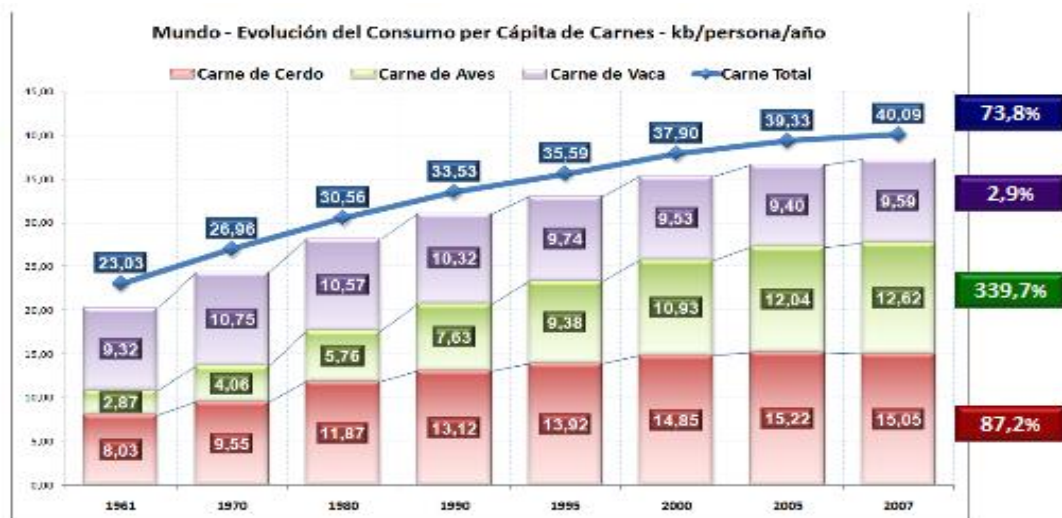


FIGURA 2. Consumo de carne per cápita mundial (Desouzart, 2011).



Dentro de los 15 principales países productores de la carne de cerdo México ocupa el séptimo lugar con una producción de 1,158 Ton. (Figura 3).



FIGURA 3. Principales productores de carne porcina (Desouzart, 2011).

Las exportaciones de carne de porcino fresca, refrigerada o congelada tuvieron un crecimiento constante hasta el año 2000; a partir del siguiente año empezaron a descender hasta llegar a su nivel más bajo en 2003. El año 2004 marca una recuperación, pero esta se encuentra muy por debajo de las exportaciones efectuadas en el 2000. En el lapso 1997-2007 la tasa media anual de crecimiento fue de 7,6%. El principal destino de la carne porcina es Estados Unidos, país al que se envía el 49,5% de las exportaciones totales, seguido por Japón con el 48,4% como se muestra en la tabla 1 (www.siap.gob.mx).

Dentro de las importaciones se encuentra a la carne congelada que represento un poco menos del 10% del total de la carne importada durante 2005; el promedio de la importación de carne congelada en los años 2000 al 2005 fue de 23 mil Ton. En cuanto a las exportaciones, en el 2005 se logro el mayor volumen con el 17,528 Ton, representando un incremento del 12,8% con respecto al año anterior en el cual se exporto un volumen de 7, 678 Ton.



TABLA 1. Exportaciones de carne porcina en México.

EXPORTACIONES MEXICANAS DE CARNE DE PORCINO FRESCA, REFRIGERADA O CONGELADA 1997-2007												
(TONELADAS)												
PAÍSES	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	%
EE.UU.	23,916	24,816	31,206	40,798	33,843	8,673	4,429	4,969	5,382	6,600	17,491	49,5
Japón	3,244	8,303	5,563	1,060	841	14,729	17,150	20,922	30,261	36,989	49,132	48,4
Otros	973	0	587	170	447	70	26	702	1,743	1,524	1,821	2,1
Total	28,133	33,126	37,356	42,028	35,131	23,472	21,604	26,593	37,386	45,113	58,723	100

SIAP, 2013

Actualmente el mercado de la carne de cerdo está demandando un producto que reúna una serie de características o combinación de factores, como son: comestible, nutritivo y saludable. La calidad de cualquier producto debe ser consistente y en especial cuando se trata de carne, contemplándose con esto, que el producto debe ser atractivo en apariencia, apetitoso y palatable. La producción de carne de cerdo deben abarcar todos los puntos que constituyen la cadena de distribución, es decir, desde la producción en la granja hasta el consumo humano pasando por el transporte, procesamiento y conservación (Baduí, 2006).

2.2 GENERALIDADES DE LA CARNE

La carne se define como la estructura compuesta por la fibra muscular estriada, acompañada o no de tejido conjuntivo, grasa, fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos, de las especies animales autorizadas para el consumo humano (NOM-009-ZOO-1994). La denominación genérica de la carne comprende la parte comestible de los músculos de los animales sacrificados en condiciones higiénicas y, desde el punto de vista bioquímico se define como la fibra estriada de los animales de abasto (Rodríguez, 2008).

El conocimiento de la estructura del músculo es esencial para entender la relación existente entre sus propiedades del mismo y el empleo como carne donde se muestra en la figura 4, donde las fibras musculares se acomodan y se mantienen en su lugar por medio de componentes del tejido conectivo que actúan como envolturas y divisoras. El tejido conectivo está rodeado por una función del



epimisio, donde se interna el músculo dando lugar a otro nivel denominado perimisio que divide al mismo en grupos de fibras llamados haces o fascículos; finalmente el endomisio rodea a cada fibra individual, esta estructura ofrece al músculo soporte y organización.

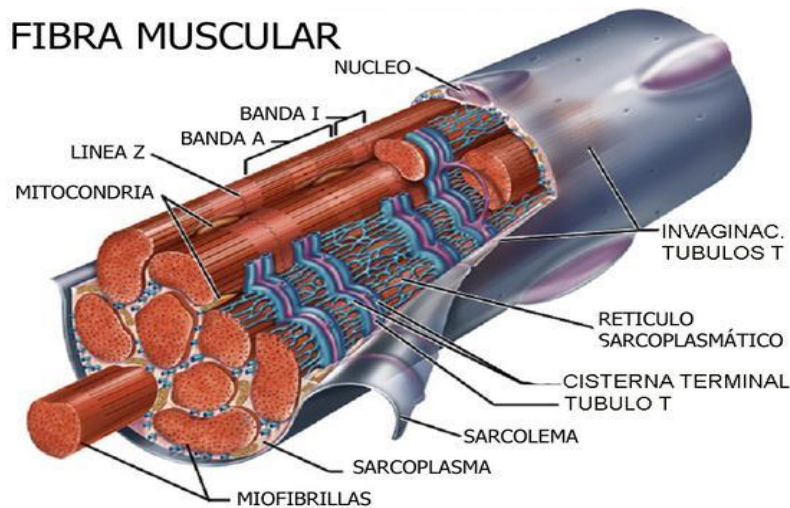


FIGURA 4. Soporte y organización de las fibrillas de la carne (Rodríguez, 2008)

Las fibras musculares están constituidas por miofibrillas longitudinales, que a su vez están formadas por miofilamentos. Existen dos tipos, los gruesos y los delgados; los primeros contienen varios cientos de moléculas de la proteína miosina, mientras que los segundos contienen dos cadenas de proteína actina (Correa y Salas, 2010) como se muestra en la figura 5.

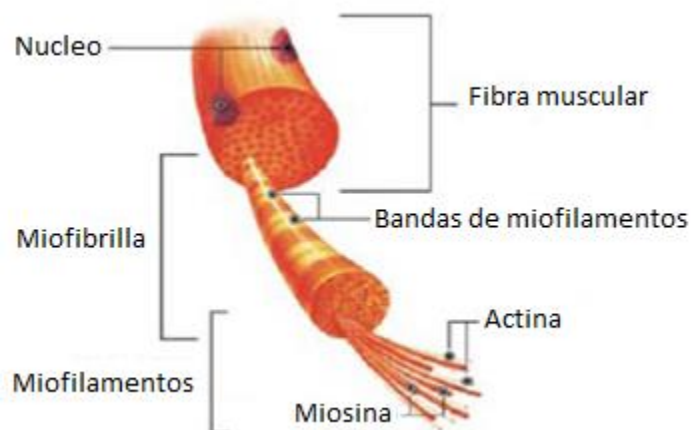


FIGURA 5. Estructura de las fibrillas de la carne (Rodríguez, 2008)



Este tipo de estructura se da debido a la composición química del lomo de cerdo, que se muestra en la tabla 2, donde se puede observar que el mayor constituyente, es el agua con un 75%. La mayor parte del agua de composición se encuentra en el interior de las células; sin embargo, las proteínas son el componente más importante del tejido (20%) de la composición química.

TABLA 2. Composición química del lomo de cerdo (*Longissimus Dorsi*)

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
AGUA	75
PROTEÍNAS	20
LÍPIDOS	3.4
CARBOHIDRATOS	1.6

(Rodríguez, 2008)

Debido a que las proteínas de la carne son las encargadas de dar la rigidez al músculo, se han clasificado en tres grandes grupos de acuerdo a su función biológica y a su solubilidad (Baduí, 2006):

a) PROTEÍNAS CONTRÁCTILES O MIOFIBRILARES

Las proteínas más importantes son la actina y la miosina estas proteínas conforman estructuralmente el tejido muscular y además transforman la energía química en mecánica durante la contracción y relajación de los distintos músculos. Es la fracción más abundante ya que equivale al 50% de éstas (Amerling, 2004).

b) PROTEÍNAS SARCOPLÁSMICAS O SOLUBLES

Están constituidas en su mayoría por los sistemas enzimáticos del metabolismo celular. Estos polipéptidos también se conocen con el nombre genérico de miogéno; son fundamentalmente globulinas y albuminas pertenecientes a los sistemas que intervienen en el metabolismo celular. De importancia dentro de este grupo es el pigmento respiratorio llamado mioglobina, responsable del color de la carne.



c) PROTEÍNAS DEL ESTROMA O INSOLUBLES

Este es un grupo muy abundante de polipéptidos; conforman el tejido conectivo fuerte de los tendones, la piel, el hueso y las capas rígidas que envuelven y soportan los músculos, como el endomisio, el perimisio, y el epimisio. A este tipo de proteínas pertenece el colágeno, la elastina, la reticulina, entre otras. Son proteínas de bajo valor biológico por la difícil digestión si no se les aplica un tratamiento térmico a altas temperaturas previo al consumo. (Vázquez et al, 2005).

Después de las proteínas el mayor porcentaje es el contenido de lípidos, los cuales son el componente más variable de la carne en cuanto a composición de ácidos grasos (Mallet, 1998). Las cadenas de ácidos grasos pueden variar en longitud de 12-20 carbonos y pueden ser totalmente saturadas, insaturadas o polinsaturadas; mientras más insaturado sea un ácido graso, menor será su punto de fusión y más susceptible será la grasa a la oxidación y desarrollo de sabores rancios y malos olores.

Los lípidos en la carne de cerdo, presentes en el tejido muscular, están en proporción no mayor de 3-5%; aportan características de jugosidad, ternura y buen sabor, además de ser indispensables en la fabricación de productos cárnicos por que aportan palatabilidad y textura.

Y por último se tiene a los carbohidratos con el 1.6% de la composición, que se encuentran libres o formando partes de otros compuestos: la glucosa, la fructosa y la ribosa, que son azúcares presentes en la carne. Entre los polisacáridos de más importancia está el glucógeno, que se almacena en el músculo esquelético y el hígado, como sustancia de reserva energética. (Amerling, 2004).

El conocimiento detallado de la composición de la carne y la manera en que estos componentes se afectan por las condiciones de manipulación, procesamiento y almacenamiento, determinan la vida de anaquel y el grado de aceptación por parte del consumidor (Hernández, 2011).



Sin embargo la composición química no es la única responsable de la calidad de la carne, existen otros factores como lo son: la edad, ya que el tejido muscular de animales jóvenes contienen mayor cantidad de agua en comparación de animales viejos, por lo general los lechones son sacrificados a la edad de 3-4 meses y los cerdos 4-6 meses (Mallet, 1998); la dieta, debido a que a través de la alimentación que lleva el animal, el crecimiento y la composición varían; y los métodos de matanza, el cerdo se sacrifica procurando que este no se ponga muy nervioso y que este descansado para que la carne este en buen estado (Rodríguez, 2008).

Los atributos que respaldan a la carne mexicana TIF (Tipo Inspección Federal) son frescura, calidad (el color, el sabor, la textura y la consistencia), higiene, sanidad e inocuidad (www.mexicocalidadsuprema.com); en este reglamento se establecen definiciones que son requisitos cualitativos en cuanto a las especificaciones de calidad organoléptica, por ejemplo:

- **COLOR:** El color normal de la carne de cerdo fluctúa entre un rojo y rosado, y juega un papel importante en la decisión de los consumidores para adquirirla, ya que estos asocian el color con la terneza y la frescura (O'sullivan et al., 2003).

- **TEXTURA:** Existen 5 rangos de textura en la carne:

Rango 1: Muy suave y húmeda conocida como carne PSE (pálida, suave y exudativa).

Rango 2: Suave y húmeda.

Rango 3: Poco firme y jugosa.

Rango 4: Firme y moderadamente seca.

Rango 5: Muy firme y seca, conocida como carne DFD (obscura, firme y seca).

- **MARMOLEO:** Se refiere a la grasa que es visible entre las fibras musculares.



La carne fresca es un producto altamente perecedero debido a su composición química.

La conservación de este alimento es de suma importancia debido a que la mayoría de las carnes constituyen excelentes medios de cultivos por su alta humedad, pH casi neutro y abundancia de nutrientes para la proliferación de microorganismos; por lo tanto hace necesario buscar un método de conservación que dañe lo menos posible al alimento.

La inocuidad de la carne y productos cárnicos está relacionada a la cadena de frío, la cual comienza con el enfriamiento inicial de la canal recién sacrificada y continua hasta el almacenamiento de la porción fría en el hogar (Genot, 2003).

La cadena de frío es una parte de la cadena de suministro en donde el monitoreo automatizado de la temperatura es fundamental para poder garantizar alimentos seguros.

2.3 CONGELACIÓN DE LA CARNE

La congelación desde un punto de vista tecnológico consiste en la aplicación de temperaturas a los alimentos por debajo de 0°C (Petzold, 2009), de forma que parte del agua del alimento se convierte en hielo. Al mismo tiempo, como el agua se solidifica, se produce una desecación superficial. La congelación de los tejidos se inicia por la cristalización del agua en los espacios extracelulares puesto que la concentración de soluto es menor que en los espacios intracelulares.

Cuando la congelación es lenta, la cristalización extracelular aumenta, así como la concentración local de solutos, lo que provoca la deshidratación progresiva de las células. En esta situación se forman grandes cristales de hielo aumentando los espacios extracelulares, provocando afecciones en la textura y dando lugar a la aparición de exudados durante la descongelación.

Cuando la congelación es rápida la cristalización se produce casi simultáneamente en los espacios extracelulares e intracelulares. El desplazamiento del agua es pequeño, produciendo un gran número de cristales pequeños y por lo tanto las



afecciones en el alimento resultan considerablemente menores en comparación con la congelación lenta.

Se espera que un alimento solidifique cuando se enfría el líquido a su temperatura de solidificación, cuando esto ocurre, la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es progresivamente menor que la energía del líquido, haciendo cada vez más estable al sólido conforme la temperatura se hace menor, disminuyendo la entropía del sistema. (Morgan et. al., 1978). Por lo cual existen cambio de estado del agua.

Si durante el proceso de congelación se registra la temperatura del alimento en su centro térmico (punto que se congela en un mayor tiempo), el proceso se puede describir en tres etapas como se muestra en la figura 6:

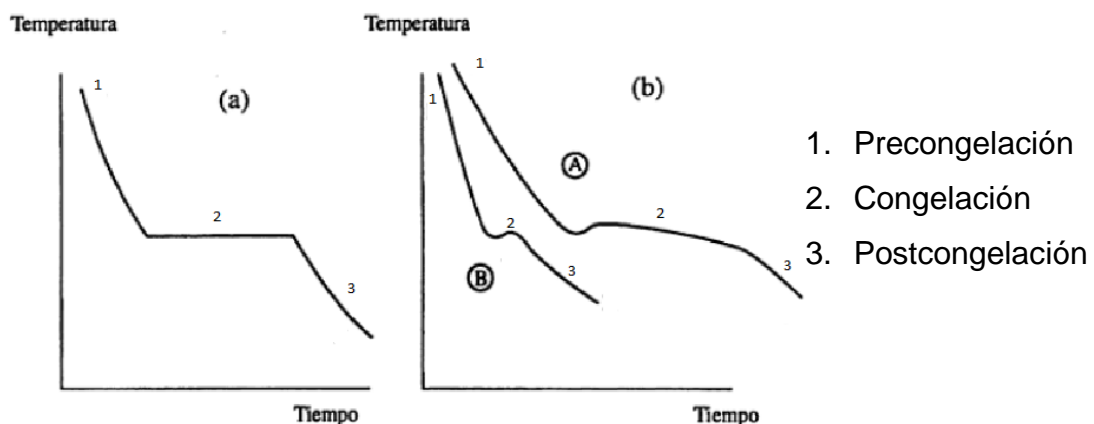


FIGURA 6. Curva de congelación (a) Agua, (b) A alimento congelación lenta, B alimento congelación rápida. (Martínez, 1998).

1. Fase de pre-congelación o enfriamiento en la que se enfría el material desde su temperatura inicial hasta la temperatura del punto de congelación;
2. Periodo de remoción del calor latente de cristalización.
3. Fase de templado o subenfriamiento en la que el producto alcanza la temperatura final de almacenamiento (Delgado, 2001).



Desde el punto de vista termodinámico se consideran dos etapas importantes: la nucleación y el crecimiento de cristales. Debido a que la transferencia de calor y masa rigen este proceso, están íntimamente relacionadas con la velocidad de remoción de calor, el tiempo de proceso y las mismas características de los cristales formados.

1. NUCLEACIÓN

Es cuando una pequeña partícula sólida se forma dentro del líquido. En el caso del agua pura, comienza la formación de núcleos homogéneos en un intervalo de temperatura de 0 a -10°C, pero a -40°C se lleva a cabo la nucleación heterogénea (Chen, 1987). La nucleación representa una transformación de un líquido no cristalino a un sólido cristalino, por lo que si un líquido es enfriado por debajo de su punto de cristalización de equilibrio (T_c), el sistema puede bajar su energía libre para formar una fase sólida como se muestra en la figura 7.

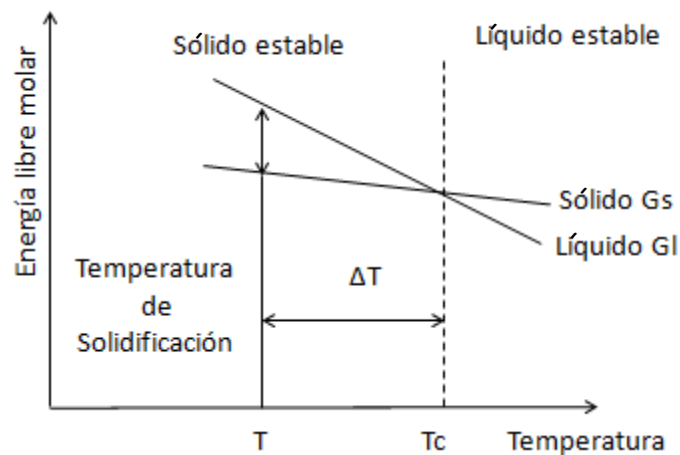


FIGURA 7. Energía libre en función a la temperatura. (Martínez, 1998).

El cambio en la energía libre para la solidificación viene determinada por la ecuación 1:

$$\Delta G = G_s - G_l \quad \text{ó} \quad \Delta G_v = \Delta H_v - T\Delta S_v \text{ ----- (1)}$$

Dónde: G_s y G_l = la energía libre del sólido y el líquido [J/kg]

H_v = entalpia con variaciones de volumen [J/Kg]



S_v = entropía con variaciones de volumen [J/Kg]

T = temperatura [K]

Cuando la congelación se ha iniciado, el número de núcleos formados, la velocidad con la que crece su tamaño, depende de la velocidad con la que el calor es transferido, que a su vez depende de la conductividad térmica (k), la capacidad calorífica (C_p), del calor latente (λ) y de la geometría del producto.

La nucleación heterogénea es el mecanismo de nucleación dominante en materias de alimentos (Zaritzky et al., 2006).

2. CRECIMIENTO DE CRISTALES

Este crecimiento es controlado por la forma y dirección de la remoción del calor en el sistema liberándose calor específico del líquido y calor latente de fusión (Ried, 1983). La principal fuerza impulsora de la cristalización es la reducción de la temperatura o la llamada cristalización por fusión. El principal factor de control es la velocidad de transferencia de calor (Mullin, 2001). La temperatura en la superficie del cristal es más alta que en la superficie del cristal fundido sobreenfriado debido al calor latente de cristalización, por lo tanto puede aplicarse la ley de Newton de enfriamiento para poder explicar los fenómenos de transferencia de calor de la superficie del cristal hacia el medio ambiente a través de la capa límite.

$$\frac{dq}{dt} = hA(T_i - T) \text{-----} (2)$$

Dónde: h = coeficiente convectivo de transferencia de calor [W/m²°C]

A = área superficial [m²]

T = temperatura interfaseal [°C]

T_i = temperatura a un tiempo determinado [°C]



El flujo de calor por conducción en la dirección “x” a través del material que comienza a congelarse se rige por la primera ley de Fourier en estado estacionario:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \text{----- (3)}$$

Dónde: q_x = flujo de calor

k = conductividad térmica [W/m°C]

A = área [m²]

dT/dx = velocidad de enfriamiento [°C/s]

La formación de cristales de hielo no es un proceso espontáneo, posterior a la nucleación hay un avance progresivo del frente de hielo a la vez que una difusión de solutos hacia las zonas con movimiento molecular reducido pero aun en estado fluido, lo que involucra la presencia de transporte de materia (Sun y Zhu, 1999).

Este movimiento molecular permite el acomodo de la formación ordenada del hielo; sin embargo, depende de las condiciones de presión y temperatura por lo que es posible que adopten diferentes formas. Se han identificado 16 formas de hielo como se muestra en la figura 8.

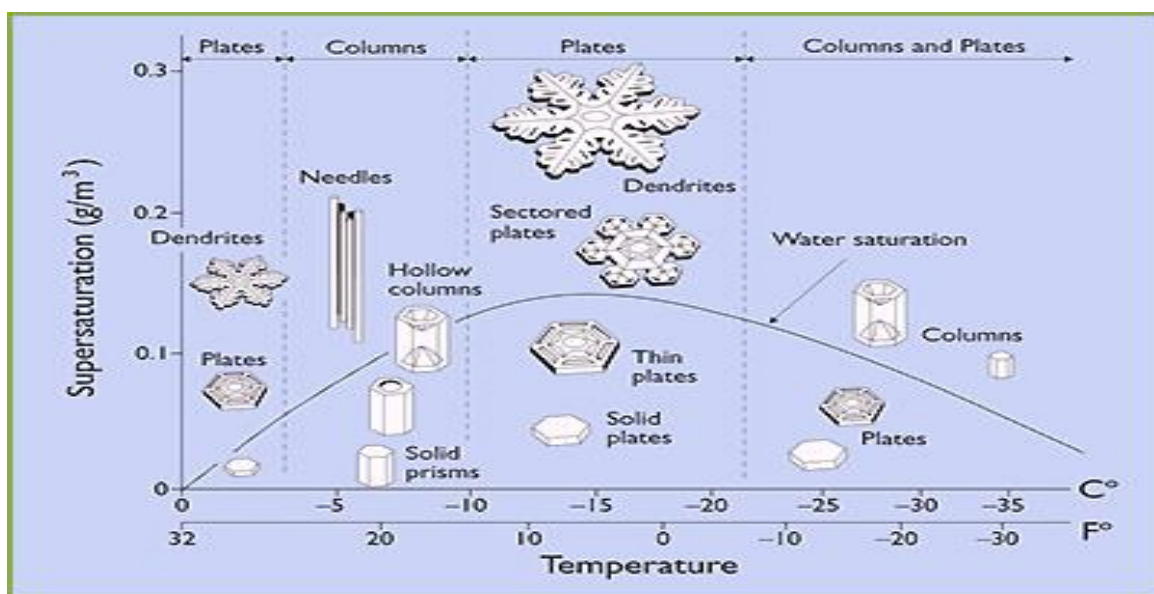


FIGURA 8. Distintas formas de hielo en función de la temperatura. (Petzold, 2009).



Todas estas formaciones tienen estructuras compactas o presentan modificaciones alotrópicas. El hielo puede aparecer en dos fases amorfas (vítreas): el hielo amorfo de baja densidad (940 Kg/m^3) a -196°C y 1 atm y el hielo amorfo de alta densidad (1170 Kg/m^3) a las mismas condiciones.

En los alimentos no aparece el agua nunca en su estado puro si no en forma de soluciones; una parte del agua se halla firmemente ligada en las estructuras proteicas y polisacáridos (Baduí, 2006). Una parte del agua que está sólidamente unida a las sustancias proteicas no se congela nunca, ni siquiera con temperaturas muy bajas, esto influye sobre las propiedades de la solución congelada y provoca el descenso de la entalpia específica de solidificación. Durante la congelación de los materiales biológicos existe un agrietamiento del material o una ruptura de la pared celular que propicia daños texturales y modificaciones en la forma y tamaño.

El tiempo de congelación efectivo viene determinado, por una parte, por las características de la carne como la especie, tamaño, temperatura inicial, etc. y por otra parte por las condiciones del proceso congelador. El periodo de congelación en la carne se caracteriza por la temperatura de congelación inicial, índice de nucleación y la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo. (Gruda, 1986).

Las pérdidas de agua en la carne se deben al cambio de fase que sufren los cristales de hielo, cuando este se sublima generando un fenómeno de deshidratación superficial e irreversible favoreciendo a una serie de reacciones oxidativas. Esta pérdida prevalece cuanto mayor sea la temperatura de almacenamiento, ya que en la superficie del producto la presión parcial del vapor de agua aumenta con la temperatura (Sakata et al., 1995).

La congelación de la carne es un sistema de conservación que puede llegar a afectar en cierto grado algunos atributos sensoriales, debido a que es un alimento provisto de una estructura celular ordenada puede verse agredida por la formación de cristales de hielo (Umaña, 2008). Se sugiere para la carne congelada una temperatura de -45°C como condición de almacenamiento, para evitar cambios de



calidad puesto que las reacciones enzimáticas y oxidativas de los ácidos grasos es mínima (Hansen et al., 2004). De esta manera, la congelación produce alteraciones muy escasas en comparación con otros métodos de conservación, por lo cual garantiza una mayor capacidad de conservación.

Cuando la carne congelada se mantiene a temperatura constante, los cristales aumentan progresivamente de tamaño con el tiempo de almacenamiento; paralelamente la capacidad de retención de agua disminuye y la cantidad de exudación durante la congelación crece. Schmidt y Won (2009) establecen que la pérdida de humedad y la degradación asociada en el color, la pérdida de textura y el sabor durante el almacenamiento congelado, producen una superficie deshidratada opaca mejor conocida como quemaduras por frío.

Cuando la temperatura de almacenamiento fluctúa, existe un deshielo seguido de una recrystalización, empezando con los cristales de mayor tamaño; además las aperturas de puertas en un conservador permiten la entrada de aire caliente y húmedo, por lo que los productos almacenados despiden también humedad contribuyendo a la formación de escarcha, cristalización de hielo que llega a impedir el paso de aire y a convertirse en un medio aislante dificultando la transmisión térmica (Alarcón, 1998).

2.4 ESCARCHA

La escarcha se considera como un medio poroso que en la actualidad es ampliamente aceptado como tal (Wang y Brenam., 2012). En rigor la fase sólida tendría un volumen variable con respecto al tiempo, debido a la solidificación del vapor que difunde a través de los poros formados en los espacios de la estructura arbórea de la escarcha producida (Lee, 2005).

Los factores que influyen en la formación de escarcha en las superficies frías son muchos, entre los cuales se encuentran la temperatura de la superficie, la velocidad, la temperatura del aire y humedad relativa del mismo, entre otros. Gatica (2000) describe la formación y el crecimiento de la escarcha en una placa



limpia, a temperatura bajo cero grados centígrados que es expuesta a un flujo de aire húmedo. Esta formación se puede resumir en tres periodos:

1. **Periodo del crecimiento del cristal:** Se caracteriza por la condensación y congelamiento de pequeñas gotas de agua. Sobre el núcleo de hielo formado surgen cristales de hielo que crecen verticalmente a tasa casi constante.
2. **Periodo de crecimiento de escarcha:** En este periodo el cristal presenta un aspecto más uniforme debido a la ramificación e interconexión de los cristales de hielo. La capa de escarcha se torna en un material poroso homogéneo, hecho de una matriz de hielo sólido y poros llenos de aire húmedo. La transferencia de masa en la capa de escarcha lleva al proceso de crecimiento y densificación del depósito poroso. Tudor (2013), consigue controlar la forma de crecimiento de los cristales de escarcha utilizando campos eléctricos.
3. **Periodo de crecimiento intenso:** Este aparece cuando la temperatura superficial alcanza la temperatura del punto triple del agua debido al aumento de la resistencia térmica del hielo. El vapor de agua condensado en la superficie de la capa de escarcha, forma una película líquida que satura la capa de escarcha, y se congela en las áreas más próximas a la pared fría. Así ocurre un proceso cíclico de fusión, congelamiento y crecimiento hasta lograr el equilibrio térmico de la capa de escarcha.

Por lo tanto, cuando el vapor de agua en el aire circundante se pone en contacto con una superficie que transfiere calor, cuya temperatura es inferior a la del punto triple del agua, inevitablemente se formara escarcha sobre la superficie a través de la transferencia de masa (Zhongliang et al., 2007).

La formación de escarcha y la fusión de la misma en materiales complejos como la carne, tienen gran importancia ya que modifica características de calidad como el color (Laguerre y Flick, 2007) y el daño estructural de las fibras. La formación de



escarcha minimiza la deshidratación de los alimentos al sellar la salida de los jugos o agua con agentes que propician sabor por la formación de una corteza en la capa externa de un producto alimenticio.

2.5 DIFUSIVIDAD DE LOS SÓLIDOS POROSOS

La modelación fisicomatemática utilizada por Lüer y Beer (2000), considera al aire húmedo forzado sobre la escarcha, a las propiedades del aire variables en la capa porosa, a la presión total constante de la fase gaseosa y al aire húmedo como mezcla de gases ideales y saturado en el interior de los poros.

Sin embargo, cuando existen pérdidas por evaporación o por sublimación en el contenido de agua en los alimentos se debe a que la presión parcial de vapor de agua en el entorno (generalmente aire) es inferior a la del producto. Estas pérdidas son directamente proporcionales a la superficie de contacto, a la diferencia de las presiones de vapor, a la duración del tratamiento y al coeficiente de intercambio superficial de masa, el cual depende de la velocidad de circulación de aire y del estado físico del producto (Genot, 2003).

Cuando se presente un diferencial de presiones en el sistema, existirá una difusión de la humedad del aire hacia la superficie de la carne, cuya distribución nunca va a ser uniforme; esta difusión se define como la transferencia o desplazamiento de las moléculas individuales a través de un fluido por medio de los desplazamientos desordenados de estas mismas, formando así la estructura arbórea de la escarcha provocando un sólido poroso (Vargas, 2008).

En sistemas heterogéneos gas-sólido, el tamaño de partícula y el diámetro medio de poro influyen sobre la velocidad de reacción por unidad de masa de sólidos si la difusión interna resulta ser controlante de la velocidad. La forma real de transporte dentro de la estructura porosa dependerá en gran medida del radio medio de los poros y de las condiciones de presión del sistema (Coulson, 1984). Los sólidos porosos que tienen canales o espacios vacíos interconectados afectan a la difusión, generando que se tengan tres tipos de sistemas porosos:



- a) Interconectados: el fluido puede alcanzar un punto dentro del poro cuando haya por lo menos dos rutas.
- b) Vía cerrada: el fluido solo puede alcanzar un punto dentro del poro por una única vía (boca del poro).
- c) Aislado: que es inaccesible al medio externo. (Cuevas, 2010).

Los mecanismos de difusión en un sistema gas-sólido poroso son los siguientes:

- DIFUSIÓN HIDRODINÁMICA. Depende de los gradientes de presión; siempre que se establezca una diferencia de presiones los fluidos se mueven.
- DIFUSIÓN MOLECULAR. Causada por la diferencia de concentraciones, como resultado del movimiento de las moléculas individuales a través de un medio, debido a la energía térmica que poseen. En un sistema poroso se requiere que la trayectoria libre media (λ) sea menor al diámetro del poro (d) como se muestra en la figura 9.

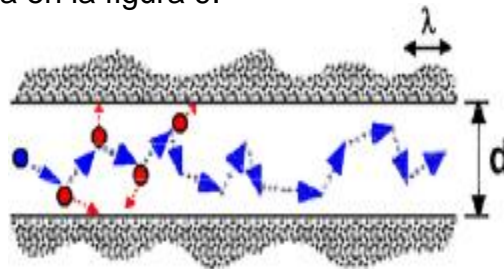


FIGURA 9. Difusión molecular en un sistema poroso. (Cuevas, 2010).

- DIFUSIÓN TIPO KNUDSEN. Se presenta cuando la rapidez de difusión está gobernada por los choques de moléculas del fluido con las paredes que forman los poros.

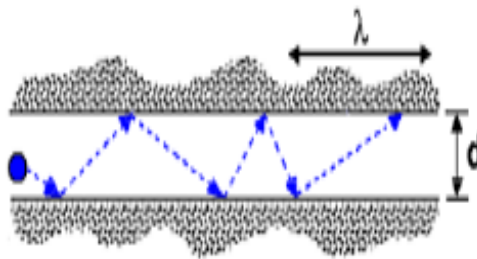


FIGURA 10. Difusión tipo Knudsen (Cuevas, 2010)



En la figura 10 se observa que para este tipo de difusión la trayectoria libre media (λ) es de mayor longitud que el diámetro de los poros (d); entonces es más probable que una molécula choque con la pared del poro antes de encontrarse a otra molécula.

- **DIFUSIÓN SUPERFICIAL.** Es un fenómeno que acompaña a la adsorción sobre la superficie de los poros del sólido. Es la difusión “activada” e implica el paso de moléculas adsorbidas en un sitio a otro adyacente, explicado por la migración como se muestra en la figura 11.

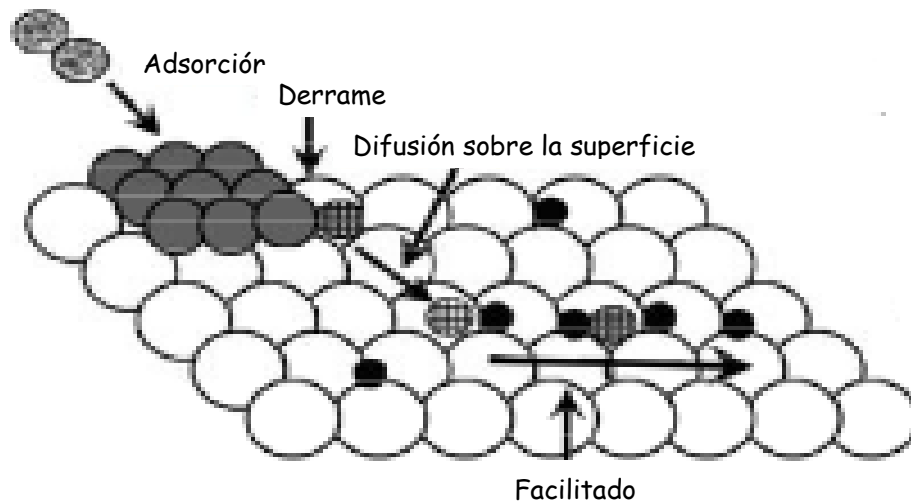


FIGURA 11. Difusión superficial

En este tipo de difusión se tienen fragmentos moleculares que tienen la capacidad de moverse sobre la superficie, después de quimiosorberse. Se estima que la difusión superficial se puede describir utilizando una ecuación análoga a la ecuación de Fick:

$$N_{AS} = -D_s \frac{dC_{AS}}{dx} \text{-----} (4)$$

Donde N_{AS} = flux superficial [mol/s m²]

D_s = difusividad superficial [m²/s]

C_{AS} = concentración en la superficie [mol]



Considerando la escarcha como un sólido poroso, se presentan principalmente tres tipos diferentes de difusión durante su formación, crecimiento y fusión: la difusión molecular (D_{AB}), la difusión Knudsen y la difusión superficial (D_{AS}). Para poder determinar la difusión real existente se utiliza el término de difusividad efectiva (D_{ef}), este tipo de difusividad debe estar basada en propiedades fácilmente medibles, por ejemplo:

1. La superficie externa que ocupa la partícula.
2. Una distancia fácilmente determinable.

Este tipo de difusión representa una combinación compleja del mecanismo físico implicado en la evolución de la formación, crecimiento y fusión de la escarcha (LeGall y Grillot, 2007):

- Difusión ordinaria.
- Tortuosidad del medio poroso.
- Transición de fase (ablimentación).
- Metamorfismo dentro de la estructura arbórea de la escarcha.
- Variaciones de la presión y temperatura gaseosa dentro de los poros.

Sin embargo, se ha propuesto una ecuación empírica (Ahmet, 2000) para determinar la difusividad efectiva del vapor de agua generado por la formación de escarcha:

$$Def = 2.11 * 10^{-5} \left[\frac{T}{T_0} \right]^{1.94} \text{-----} \quad (5)$$

Donde: Def = difusividad efectiva [m/s^2]

T = temperatura a un tiempo t [K]

T_0 = temperatura de referencia 273.15 [K]

Si se observa un poro formado en el interior de la estructura arbórea del hielo, próximo a la superficie fría, este quedara deficiente de vapor de agua al paso del tiempo a causa de su transformación en hielo en la superficie de dicha estructura.



Así la mayor concentración de vapor de agua en las capas superficiales del depósito de escarcha se difunde con la finalidad de compensar el desequilibrio provocado por la ablimentación. La escarcha se forma cuando la humedad del aire entra en contacto con una superficie fría, cuya temperatura es inferior a la temperatura de congelación, y es menor que la temperatura de rocío, de manera que el vapor de agua pasa directamente desde un estado gaseoso a un estado sólido.

Durante la formación de escarcha, una porción del flujo de masa total de vapor de agua se difunde a través de la capa de escarcha y se somete a una transformación de fase, es decir, que se depositan sobre los cristales de escarcha existentes (Kandula, 2011).

2.6 PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA ESCARCHA

Una sustancia pura puede existir en una de las tres fases, o en una mezcla de ellas; no todas las sustancias pasan en un cambio de estado por las tres fases (Faires, 1999). Cuando un cuerpo por acción del calor o el frío pasa de un estado a otro, se dice que ha cambiado de estado, los diferentes cambios de estado existentes son los que se muestran en la figura 12.

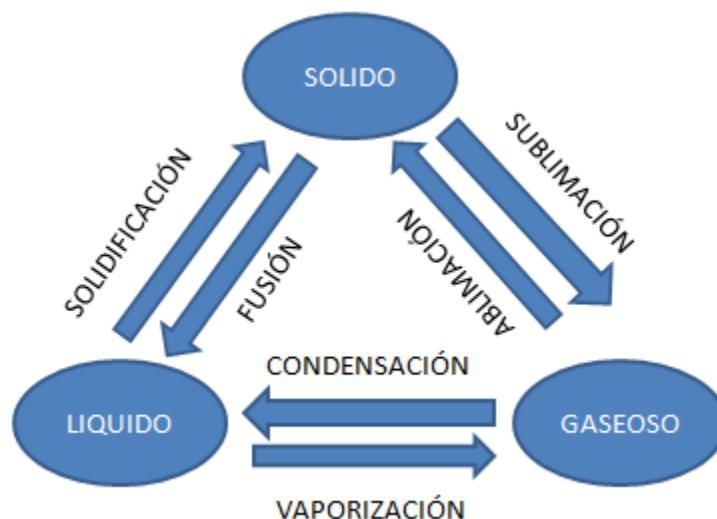


FIGURA 12. Estados de agregación de la materia (Engel, 1985)



Las condiciones de equilibrio se pueden subdividir en forma conveniente en equilibrio térmico, mecánico y de potencial químico. Si la temperatura y la presión son constante, la igualdad de velocidades de sublimación y ablimación requieren que en el sistema haya un mínimo de energía libre (Phillip, 2008). Esto se puede observar claramente en un diagrama de fases; estos diagramas de estado vienen definidos por un par de ejes coordenados que representen dos propiedades de un sistema, o bien tres ejes coordenados en el espacio.

En cada punto se representa un estado y solo uno el sistema de equilibrio, en el que habrá un valor determinado para cada una de las propiedades termodinámicas en cada punto (figura 13).

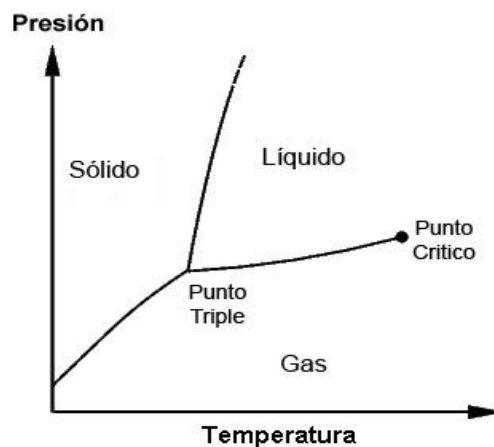


FIGURA 13. Diagrama de fases P vs T (Faires, 1999)

El punto triple muestra un conjunto de condiciones en las que la fase sólida, líquida y gas coexisten en un equilibrio entre sí; donde la fase líquida y gaseosa ya no se distinguen es conocido como punto crítico, estas características de la materia vienen determinadas por las propiedades termofísicas de las mismas (Ball, 2003).

La cantidad de calor que debe suministrarse a un sistema cerrado para que se realice un determinado cambio de estado, depende de la forma en cómo se realice el proceso. En un proceso reversible es posible relacionar el calor específico (C_p) con una propiedad del sistema:



$$C_p = \left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_p \text{-----(6)}$$

Dónde: C_p = calor específico [J/KgK]

$\delta H/\delta T$ = diferencial de entalpia en función de la temperatura [J/Kg]

p = presión [atm]

El calor específico de un sistema se define como la cantidad de calor que entra o sale por unidad de masa cuando varían un grado su temperatura. (Faires, 1999).

Para el proceso de formación, crecimiento y fusión de escarcha, Gatica y col. (2009) encontraron una relación entre el gradiente de temperatura y el calor específico mediante la siguiente expresión:

$$C_p = 2109 + 3.66(T - 273.15) \text{-----(7)}$$

Donde: C_p = calor específico en [J/KgK]

T = temperatura [K]

Todas las fronteras de fase están caracterizadas por la entalpia de transformación (calor latente). En el punto triple coexisten las tres simultáneamente, por lo que ninguna propiedad intensiva puede ser cambiada sin la desaparición de por lo menos una fase; no existen propiedades independientes. Cuando una sustancia cambia de fase se producen cambios de calor relativamente considerables a temperatura constante. Estos cambios de calor se producen por un diferencial de entalpia:

$$\lambda = C_p (\Delta H) \text{-----(8)}$$

Dónde: λ = calor latente [J/Kg]

C_p = calor específico [J/KgK]

H = entalpia [J/Kg]

La entalpia por definición es la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno y expresa una medida de la cantidad de energía



absorbida o cedida por sí mismo; por lo tanto, cuando haya un cambio de fase existirá un gradiente de entalpía.

El principio de estado, en su forma simplificada, refiere que para determinar el estado termodinámico de un sistema simple, bastan dos propiedades intensivas independientes entre sí. Relacionando con las leyes de la termodinámica correspondientes a un cambio en la entropía del sistema la segunda ley de la termodinámica dice:

“En un estado de equilibrio, los valores que toman los parámetros característicos de un sistema termodinámico cerrado son tales que maximizan el valor de una cierta magnitud que está en función de dichos parámetros, llamada entropía” (Callen, 1985).

De esta manera se encuentra la importancia que tiene la entropía con respecto a los cambios de fase y a su equilibrio, y es demostrado en las relaciones de Maxwell con un sistema isobárico:

$$\left(\frac{\delta T}{\delta P}\right)_S = -\left(\frac{\delta V}{\delta S}\right)_P \text{-----(9)}$$

Dónde: δT = diferencial de temperatura del sistema [K]

δP = diferencial de presión del sistema [atm]

δV = diferencial de volumen [m³]

δS = diferencial de entropía (J/Kg)

La porción de la energía total del sistema que no está disponible, es una medida de la degradación de la energía al pasar de un estado a otro; la variación de entropía en los alrededores depende solamente de la energía térmica transferida al o desde el sistema a presión y temperatura constante (De la Peña, 1981). Para un determinado cambio se produce a menor temperatura. En sistemas a presión constante, la variación cuantitativa de entropía térmica se expresa como:



$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T} \text{-----(10)}$$

Donde: S= entropía [J/Kg]

H= entalpia [J/Kg]

T= temperatura [K]

Siempre que se realiza un proceso irreversible hay una cantidad de energía que pasa a una forma adecuada para convertirla en trabajo, y existe una magnitud que mide la energía que no puede utilizarse para producir un trabajo (entropía).

Tomando en cuenta que en cualquier proceso o cambio que sufra un sistema se requiere de un gasto energético, entonces existirá una dependencia de la temperatura a partir de la teoría del estado de transición. Cuando la humedad del aire se difunde sobre una superficie fría habrá un desequilibrio de fases durante un tiempo determinado, existirá un cambio en la energía de activación y la velocidad con la cual el sistema llegará al equilibrio, dada por la constante de Boltzman (k) y la constante de Planck (h) (Levenspiel, 2005). Si se tiene un desorden energético (entropía) en el sistema, se puede encontrar la relación entre las constantes de velocidad del equilibrio y el desorden energético representado en la ecuación 11.

$$\Delta s = R \left(\ln A - \ln \left(\frac{k}{h} \right) - \ln T \right) \text{-----(11)}$$

Dónde: ΔS = gradiente de entropías [J/Kg]

R= constante de los gases ideales [J/K mol]

A= energía de activación a tiempo t [J/Kg]

K= constante de Boltzman [J/K]

h = constante de Planck [Js]

T= temperatura [K]

Estos cambios energéticos, provocan un cambio en las propiedades del alimento así como en su textura, ya que son funciones de estado que dependen de la temperatura y por lo tanto existen cuando el sistema está en una transición de fase.



Los tipos de cambio en la textura del alimento pueden ser medibles mediante técnicas instrumentales (medida de la capacidad de retención de agua y de las propiedades mecánicas con sistemas de tracción-compresión), o mediante el análisis sensorial.

La textura es el conjunto de propiedades mecánicas, geométricas y superficiales de un producto perceptibles por los mecano-receptores táctiles, eventualmente, por los receptores visuales y por las auditivos (Afnor, 1991); en el caso de la carne, la textura corresponde esencialmente a sensaciones de jugosidad (Hernández, 2011).

La crioconcentración de los solutos en el transcurso de la congelación puede provocar modificaciones de la estructura de las proteínas musculares y de sus propiedades y, en consecuencia, contribuir a modificar la calidad de la carne. Los mecanismos exactos de la desnaturalización de las proteínas de los músculos congelados no están aun completamente aclarados y su impacto real sobre la calidad de la carne no se encuentra perfectamente establecido. (Mackie, 1993). Una nueva técnica para evaluar el cambio de textura es denominada “textura de imagen”, que ha sido utilizada para la evaluación y la inspección de atributos alimenticios. Los resultados de estudios anteriores muestran que las características de textura de estos métodos son competentes para indicar cualidades alimentarias. (Bertrand, 1992).

2.7 ANÁLISIS DE TEXTURA DE IMAGEN

El análisis de textura juega un papel importante en el procesamiento de imágenes; la principal clase de características extraídas dependen de la suposición con la cual se pueden definir las propiedades estadísticas locales de un pixel en escala de grises (Zheng, 2006). Mulet& col. (2000) investigaron el cambio a lo largo del proceso de secado de la patata y la coliflor por análisis de imagen, Ramos y col. (2004) estudiaron e encogimiento en el tejido de uva a nivel microscópico mediante el análisis de imagen, cuantificando parámetros relacionados con la dimensión celular.



Bevck y Kononenko (2002) definen la textura de imagen como una función de la variación espacial en los valores de píxeles mientras que Jayas y col. (2000) lo definen como la distribución de color de una imagen con respecto a las coordenadas espaciales evaluadas cualitativamente, obteniendo propiedades como finura, suavidad, granulosidad y rugosidad.

La fotografía científica permite la recopilación y registro de los acontecimientos que a veces no se pueden observar de forma natural como es el proceso de formación, crecimiento y fusión de escarcha en la superficie del lomo de cerdo después del proceso de congelación (Hernández, 2009).

Entre los métodos de análisis de textura de imagen se encuentran el modelo de textura estadística, el de la textura estructural, el modelo basado de la textura y el modelo basado en la transformación de la textura.

El modelo de textura estadística permite extraer una gran cantidad de información por la gran variedad de descriptores que es posible obtener de la matriz de co-ocurrencia, que hace posible caracterizarla con un conjunto de valores cuantificables de cada imagen analizada. (Zheng, 2006).

La información contenida en las características de la imagen (color, tamaño, forma y textura) se procesan y se seleccionan de las diferentes imágenes tomadas a una muestra como se observa en la figura 14; a mayor número de imágenes aumentara considerablemente el tiempo de cálculo y de almacenamiento de carga, debido a la gran escala de datos de las imágenes.

La matriz de co-ocurrencia es la relación estadística de una intensidad de píxeles a la de sus píxeles vecinos, que se ha utilizado para el análisis de textura de imagen (Fernández et al., 2003).

Estas relaciones se encuentran específicamente en una dirección espacial (0° , 45° , 90° y 135°) entre los píxeles vecinos dentro de una ventana móvil en la imagen. La matriz se construye mediante el recuento del número de pares de píxeles (X_1, X_2) , (Y_1, Y_2) , con el valor de gris k y l en dirección θ y distancia d .

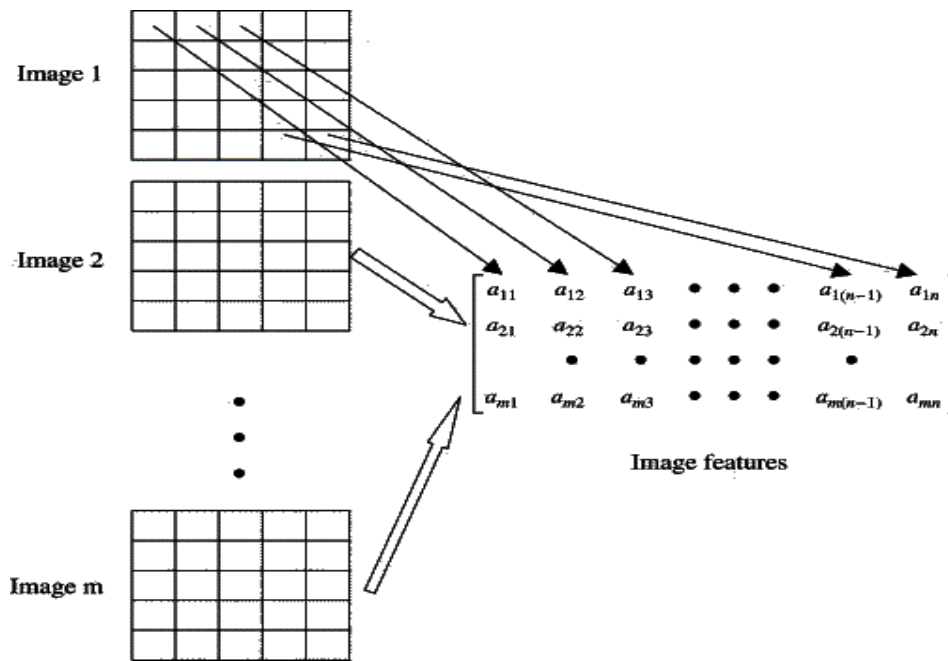


FIGURA 14. Elaboración de la matriz de co-ocurrencia.(Fernández et al., 2003)

La relación espacial entre el pixel de referencia y su vecino puede ser en cualquiera de las ocho direcciones (Norte, Sur, Este, Oeste y las 4 diagonales), pero solo se toman cuatro, ya que la Norte es opuesta a la sur y así con las demás direcciones (figura 15). Cuando se habla de una relación “espacialmente invariante” se eligen las cuatro direcciones N, NE, E y SE y se promedian esto también se expresa respectivamente como 0° , 45° , 90° y 135° (Figura 15).

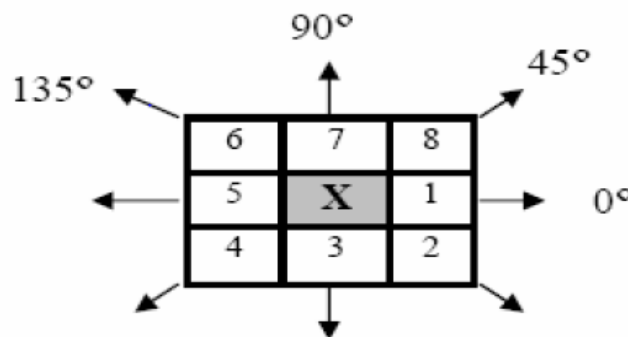


FIGURA 15. Vecinos del pixel de referencia X de acuerdo al ángulo θ para una distancia $d=1$.
(Haralick et al, 1973)



Haralick y col. (1973) proponen 14 medidas de características texturales que se derivan de las matrices de co-ocurrencia; cada una representa propiedades específicas de las imágenes, entre las cuales se encuentran:

1. Segundo Momento Angular (ASM), que muestra la uniformidad de la imagen:

$$ASM = \sum_k \sum_l P^2(k, l) \text{-----(12)}$$

Dónde: k y l = tonalidad de pixel.

P= probabilidad existente.

2. Suma de Cuadrados (SOS), donde se obtiene la rugosidad de la imagen:

$$SOS(\sigma^2) = \sum_k \sum_l (k - \mu)^2 P(k, l) \text{-----(13)}$$

$$\mu = \sum_k \sum_l k P(k, l) \text{-----(14)}$$

Donde: μ es el valor medio de la matriz ya obtenida.

3. Entropía (ET), indica el orden que tiene una imagen:

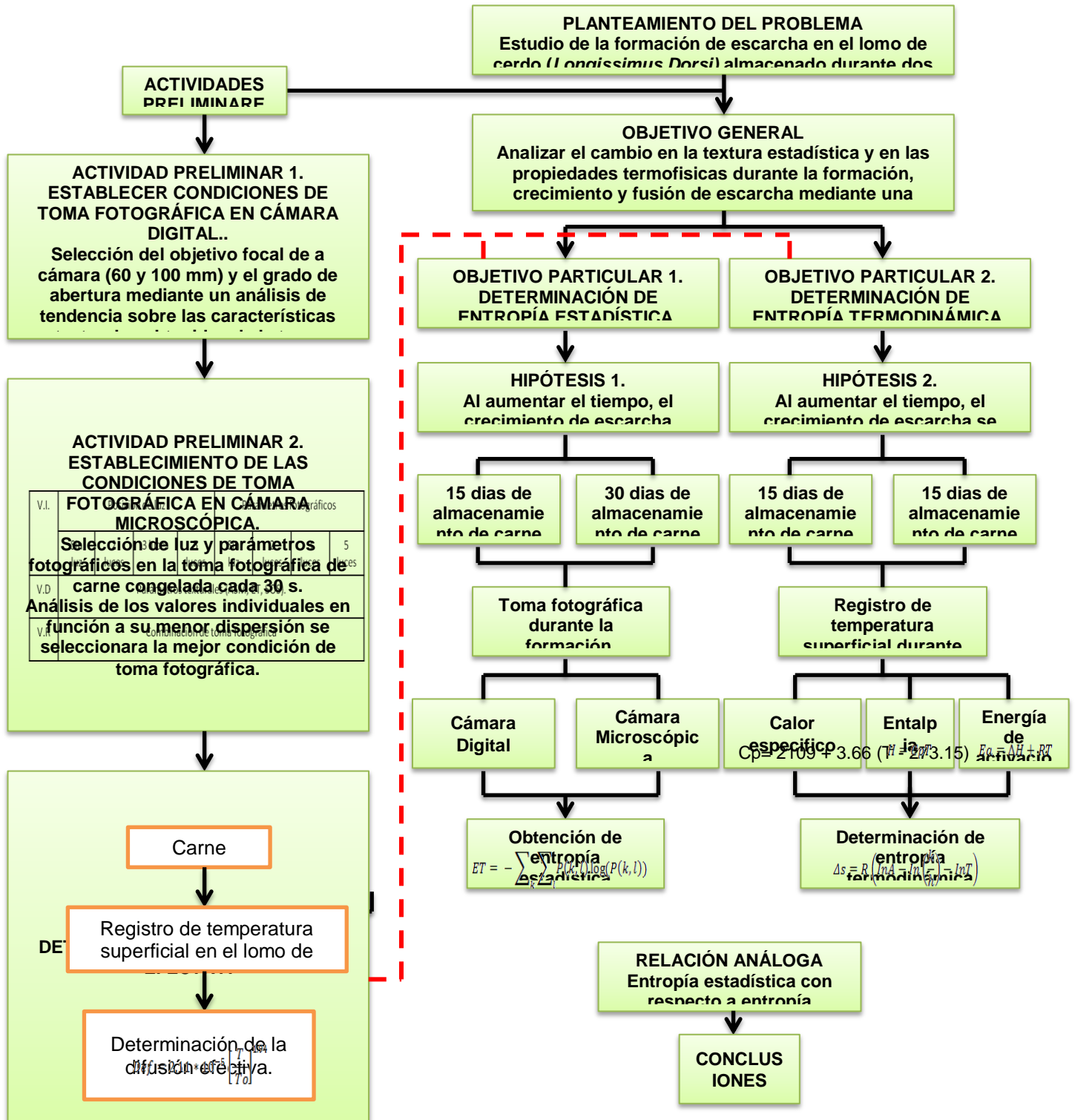
$$ET = - \sum_k \sum_l P(k, l) \log(P(k, l)) \text{-----(15)}$$

Esta técnica ha sido utilizada en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), para medir las propiedades de textura en la superficie del músculo *Longissimus Dorsi* como parte de su palatabilidad después del acuartelamiento de la canal de carne reduciendo el tiempo de evaluación (Jackman,2009).



3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

3.1 CUADRO METODOLÓGICO.





3.2 DESCRIPCIÓN DEL CUADRO METODOLÓGICO

3.2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Estudio de la formación de escarcha en el lomo de cerdo (*Longissimus Dorsi*) almacenado durante dos diferentes intervalos de tiempo a temperaturas de congelación.

3.2.2 OBJETIVO GENERAL

Analizar el cambio en la textura estadística y en las propiedades termofísicas durante la formación, crecimiento y fusión de escarcha mediante una matriz de co-ocurrencia y el registro de temperaturas en el lomo de cerdo (*Longissimus Dorsi*) almacenado a dos diferentes intervalos de tiempo a temperaturas de congelación para relacionarlo con el coeficiente de difusión.

3.2.3 ACTIVIDADES PRELIMINARES

3.2.3.1 ACTIVIDAD PRELIMINAR 1. ESTABLECER LAS CONDICIONES DE TOMA FOTOGRÁFICA EN CÁMARA DIGITAL.

MATERIALES

- ✓ Cámara Digital (CANNON EOS 1000D)
- ✓ Objetivos focales (100 y 60 mm)
- ✓ Banco óptico
- ✓ Photobox
- ✓ Lámpara
- ✓ Tripie

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

1. Se colocó el banco óptico dentro de un photobox para el control de la intensidad de luz; una parte fue cubierta por un filtro de color azul y del lado opuesto una lámpara igualando la claridad de luz en todas direcciones como se muestra en la figura 16.



FIGURA 16. Acondicionamiento del montaje fotográfico

2. Se estableció la distancia de la cámara digital entre 0.08 y 0.016 m dependiendo del objetivo a ocupar, puesto que son las distancias recomendadas para cada objetivo focal con el fin de establecer la mejor resolución de imagen en la superficie de las muestras.
3. Se seleccionó el objetivo a utilizar entre 100 mm y 60 mm y se fijó el grado de abertura del diafragma de la cámara.
4. Se colocó la cámara con un grado de inclinación de 0.091 m en dirección a la muestra de carne.
5. Las muestras fueron una placa de carne fresca, cuadradas de 5 cm con un espesor de 1 cm, a las cuales se le tomaron fotografías en intervalos de 2 minutos.
6. De las fotografías se obtuvo un análisis de textura estadística con el programa *Open CV* que realiza el cálculo de los parámetros estadísticos mediante la elaboración de una matriz de co-ocurrencia.
7. Mediante una gráfica de comportamiento con respecto al tiempo y al análisis de tendencia se seleccionaron las mejores condiciones óptimas para la toma fotográfica en cámara digital.

3.2.3.1 ACTIVIDAD PRELIMINAR 2. ESTABLECER CONDICIONES DE TOMA FOTOGRÁFICA EN CÁMARA MICROSCÓPICA.

MATERIALES

- ✓ Estereomicroscopio Leica EZ4D
- ✓ Computadora de escritorio *hp*
- ✓ Caja petri de 4.5 cm de radio
- ✓ Cronómetro



DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

1. Se seleccionaron las condiciones de luz en función a su posición. El estereomicroscopio cuenta con 5 luces, tres por la parte superior (1,2 y 3), y dos por la parte inferior (4 y 5), como se muestra en la figura 17. La prueba se realizó con todas las luces encendidas, posteriormente encendidas solo las superiores y por ultimo encendidas solo las luces de la parte inferior.

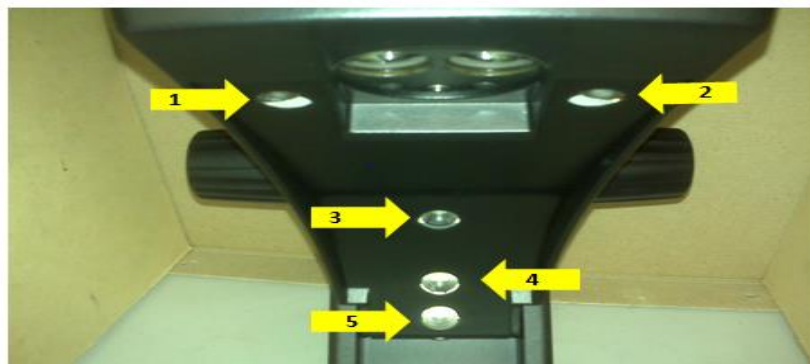


FIGURA 17. Posición de luces en cámara microscópica

2. Para cada condición de luz se estableció el brillo, la gamma y la saturación como se muestra en la tabla 3.

TABLA 3. Combinación de luces y condiciones

COMBINACIÓN 1				
LUCES	BRILLO	GAMMA	SATURACIÓN	ZOOM
Sin luz	50%	1	141	8x
Dos luces				
Tres luces				
Cinco luces				
COMBINACIÓN 2				
Sin luz	75 %	1.60	218	8X
Dos luces				
Tres luces				
Cinco luces				
COMBINACIÓN 3				
Sin luz	87%	2	260	8X
Dos luces				
Tres luces				
Cinco luces				



3. Se tomaron fotografías a las muestras de carne congelada, dando un minuto de atemperamiento antes de la primer toma, posteriormente se tomaron fotografías cada 30 segundos durante 6 minutos obteniendo alrededor de 12 fotografías por muestra. Las dimensiones de las muestras fueron una placa de carne de 3 cm de largo y ancho por 1 cm de espesor para poder ser contenidas en la caja petri con un fondo verde que permite tener un contraste de luz.
4. Se obtuvieron características de textura estadística (ASM, ET y SOS) con el programa Open Cv, y mediante un análisis de tendencia se seleccionaron las mejores condiciones para la toma fotográfica.

3.2.3.3 ACTIVIDAD PRELIMINAR 3. DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIÓN EFECTIVA

MATERIALES

- ✓ Termómetro digital infrarrojo (Cole Parmer 800-323-4340)
- ✓ Cámara de congelación (Tor-Rey modelo CV)
- ✓ Recipiente de unigel cuadrado (15 cm)
- ✓ Plástico de PVC termoencogible
- ✓ Selladora (Fresh Look turbo seal)
- ✓ Pistola de aire caliente (REVLON 1875 ionic)

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

1. Se colocó la placa del lomo de cerdo de 1cm de espesor sobre una charola de unigel envolviéndola con un plástico de PVC termoencogible.
2. El material se sometió a una congelación a -27°C durante 24 h.
3. Posteriormente se desenvolvió la placa y se realizo un registro de temperaturas superficiales cada 30 s durante el proceso de formación, crecimiento y fusión de escarcha.



4. Se determinó el coeficiente de difusión mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$Def = 2.11 * 10^{-5} \left[\frac{T}{T_0} \right]^{1.94}$$

Donde: T = temperatura superficial [K]

To = temperatura de referencia 273.15 [K]

La validación del uso de esta ecuación empírica se basa en que existen flujos de calor y de masa conforme se van generando las diferentes capas de escarcha donde para la obtención de las constantes y del comportamiento potencial de la ecuación empírica se toman en cuenta los siguientes aspectos:

- Espesor de escarcha.
- Temperatura en la superficie de la escarcha.
- Densidad de la escarcha.
- Flujo de calor que proporciona el aire sobre la superficie fría.

Donde cada uno de los parámetros mencionados anteriormente tienen un incremento continuo de forma potencial con respecto a los cambios de temperatura (Kandula, 2011).

3.2.4 OBJETIVO PARTICULAR 1.

Determinar a través de una matriz de co-ocurrencia en macro y microfotografía la formación, crecimiento y fusión de escarcha en lomo de cerdo a bajas temperaturas (-27°C) almacenado durante intervalos de tiempo de 15 y 30 días para obtener los cambios en la textura estadística.

VARIABLE INDEPENDIENTE: tiempo

VARIABLE DEPENDIENTE: crecimiento de escarcha

VARIABLE DE RESPUESTA: entropía estadística

Co-VARIABLE: temperatura ambiente



3.2.4.1 HIPÓTESIS 1.

La escarcha incrementara con respecto al tiempo así como la tonalidad de la pixelación, por lo tanto la entropía de imagen llegara a ser constante en la fusión de escarcha.

- ACTIVIDADES EXPERIMENTALES

MATERIALES

- ✓ Cámara de congelación (Tor-Rey modelo CV)
- ✓ Plato de unicel 15x15 cm.
- ✓ Estereomicroscopio Leica EZ4D
- ✓ Cronometro
- ✓ Cámara Digital CANNON EOS 1000D

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

1. Se colocaron 12 cortes de lomo de cerdo de 1 cm de espesor envasados en un sistema cerrado en la cámara de congelación a -27°C durante 15 y 30 días.
2. Al término de los 15 días de almacenamiento se colocó la muestra en el banco óptico adquiriendo una toma fotográfica con la cámara digital cada 30 s y de igual forma con la cámara microscópica.
3. Posteriormente se sometieron las imágenes a la pixelación mediante el programa *Open CV* que se encargó de realizar la matriz de co-ocurrencia como se muestra en la figura 14, obteniendo los parámetros texturales:

ASM = MOMENTO SEGUNDO ANGULAR (uniformidad de imagen).

$$ASM = \sum_k \sum_l P^2(k, l)$$

Donde: k y l = tonalidad de pixel



P = probabilidad existente

SOS = SUMA DE CUADRADOS (*rugosidad de imagen*).

$$SOS = \sum_k \sum_i (k - \mu)^2 P(k, i)$$

$$\mu = \sum_k \sum_i kP(k, i)$$

Donde: μ es el valor medio de la matriz obtenida.

ET = ENTROPÍA (*orden de pixeles*).

$$S = \sum_k \sum_i P(k, i) \log(P(k, i))$$

Se realizó el mismo procedimiento para 30 días. En cada determinación se trataron 3 replicas.

3.2.5. OBJETIVO PARTICULAR 2

Evaluar las propiedades termofísicas a partir del registro de temperaturas superficiales en el lomo de cerdo a bajas temperaturas (-27°C) almacenado durante intervalos de tiempo de 15 y 30 días para determinar el valor de entropía termodinámica.

VARIABLE INDEPENDIENTE: tiempo

VARIABLE DEPENDIENTE: crecimiento de escarcha

VARIABLE DE RESPUESTA: entropía estadística

Co-VARIABLE: temperatura ambiente

3.2.5.1 HIPÓTESIS 2

Al aumentar el tiempo, la escarcha se aproximará al equilibrio termodinámico y por lo tanto la entropía llegará a ser constante en la fusión de escarcha.



- ACTIVIDADES EXPERIMENTALES

MATERIALES

- ✓ Cámara de congelación (Tor-Rey modelo CV)
- ✓ Termómetro Digital (Cole Parmer 800-323-4340)
- ✓ Cronometro

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

1. Se colocaron placas de lomo de cerdo de 1 cm de espesor en la cámara de congelación a -27 °C durante 15 y 30 días.
2. A los 15 días se tomó una muestra y se registró la temperatura superficial en intervalos de tiempo de 30 segundos, obteniendo las propiedades termofísicas (el calor específico (C_p) y la entalpia (H)), mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$C_p = 2109 + 3.66(T - 273.15)$$

$$H = C_p T \text{ ----- (16)}$$

Donde: C_p = calor específico [J/Kg °C]

H = entalpia [J/Kg]

T = temperatura superficial [°C]

Esta ecuación involucra los factores de resistencia a la difusión que ejercen fuerte influencia en la evolución de las propiedades termofísicas de la escarcha depositada. Donde la primer constante significa el calor específico del hielo, la segunda constante involucra el calor específico del agua gaseosa (vapor) y la diferencia de temperatura en un comportamiento lineal ya que depende de la temperatura otorga como resultado el calor específico de la mezcla de vapor de agua con el hielo depositado sobre la superficie fría; a esta mezcla se le conoce como escarcha.



3. Se determinó la energía de activación mediante la siguiente ecuación:

$$Ea = \Delta H + RT \text{ ----- (17)}$$

Dónde: Ea = energía de activación [J/Kg]

ΔH = incremento de entalpía [J/Kg]

R = constante de los gases ideales [J/K mol]

T = temperatura de la escarcha [K]

4. Realizando un gráfico de energía de activación con respecto al tiempo, se linealizó obteniendo el $\ln A$ en la ordenada al origen, posteriormente se determinó el valor de entropía termodinámica mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta s = R \left(\ln A - \ln \left(\frac{k}{h} \right) - \ln T \right)$$

Dónde: ΔS = gradiente de entropías [J/Kg]

R = constante de los gases ideales [J/K mol]

A = energía de activación a tiempo t [J/Kg]

K = constante de Boltzman [J/K]

h = constante de Planck [Js]

T = temperatura [K]

Obtenidos los valores de entropía estadística y termodinámica se busco una relación análoga entre ellas en el proceso de escarchado en la carne, puesto que se establece en las hipótesis de ambos objetivos que durante estos ciclos de escarchado los valores energéticos variaran con respecto al tiempo.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos y su análisis correspondiente a la etapa experimental.

ACTIVIDAD PRELIMINAR 1. SELECCIÓN DE TOMA FOTOGRÁFICA CÁMARA DIGITAL.

La altura de la cámara fue de 1.14 m y el grado de inclinación de la cámara con respecto al eje vertical del trípode es de 0.091 m; para el control de la luz ambiental se utilizó un photobox y filtros de luz como se muestra en la figura 18.

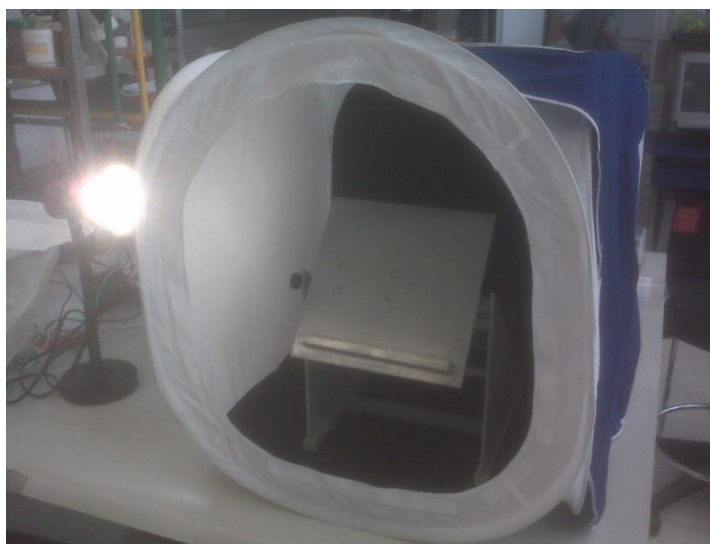


FIGURA 18. Acondicionamiento de luz para toma fotográfica.

- Selección de Objetivo

Para seleccionar el mejor objetivo entre 60 mm y 100 mm de la cámara digital se utilizaron distancias de cercanía diferentes; para 60 mm se utilizó 0.08 m y para 100 mm se utilizó 0.16 m ambas distancias con un ISO de 100.

En la tabla 4 se muestran las condiciones de la toma fotográfica para ambos objetivos:



TABLA 4. Condiciones de prueba toma fotográfica digital

CONDICIONES	Objetivo 60 mm	Objetivo 100 mm.
Placa de carne	5 cm	5 cm
Espesor	1 cm	1 cm
Temperatura ambiente	26 °C	23 °C
Tiempo de toma fotográfica	30 s	30 s

En la figura 19, 20 y 21 se observan los cambios de textura estadística con respecto al cambio de grado de abertura; la línea de tendencia (color rojo) representa el comportamiento esperado estadísticamente de la característica textural, y la línea experimental (color negro) representa el comportamiento de los valores obtenidos. El eje de las x (Index) representa intervalos de tiempo de 60 s; el grafico a y a' corresponde a SOS, el grafico b y b' representa ET y el grafico c y c' muestran los valores de ASM, con ambos objetivos.

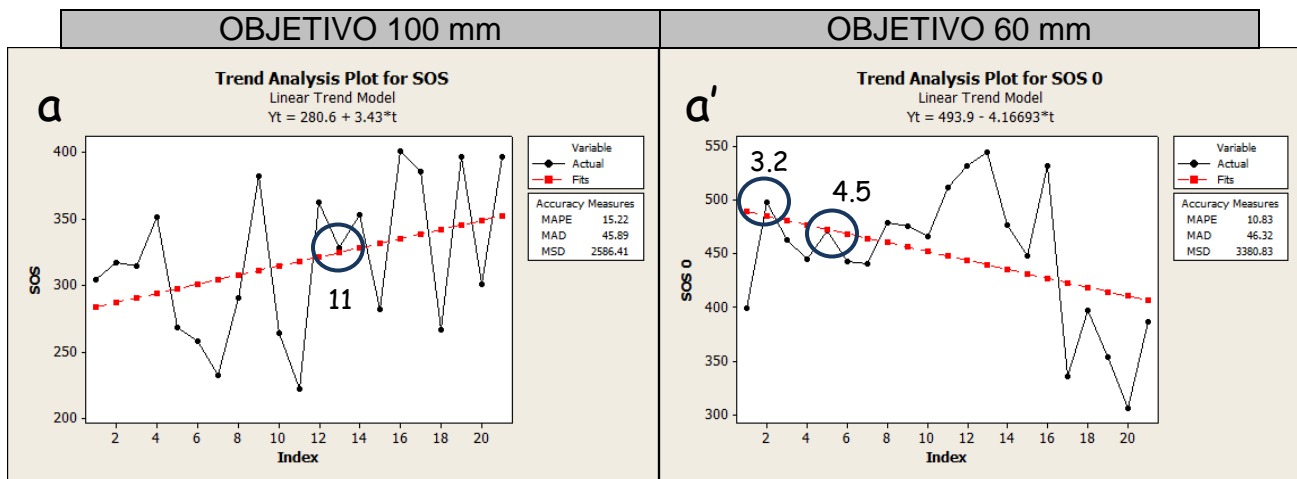


FIGURA 19. Cambios en la rugosidad de imagen (SOS).

Los puntos encerrados dentro de los círculos representan los valores de los grados de abertura que más se aproximaron a la línea de tendencia esperada los cuales fueron 11 para 100 mm y para 60 mm fueron de 3.2 y 4.5.

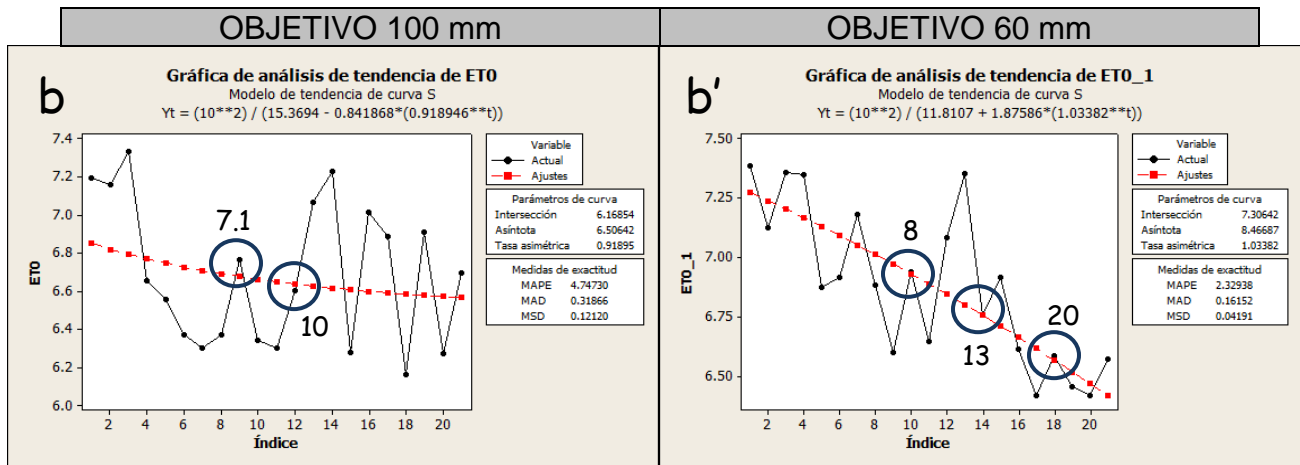


FIGURA 20. Cambios en el orden de imagen (ET).

En la característica textural ET hay mayor número de grados de apertura que se aproximan a la línea de tendencia esperada en comparación con SOS; estos grados de apertura son para 100 mm 7.1 y 10, y para 60 mm son 8, 13 y 20.

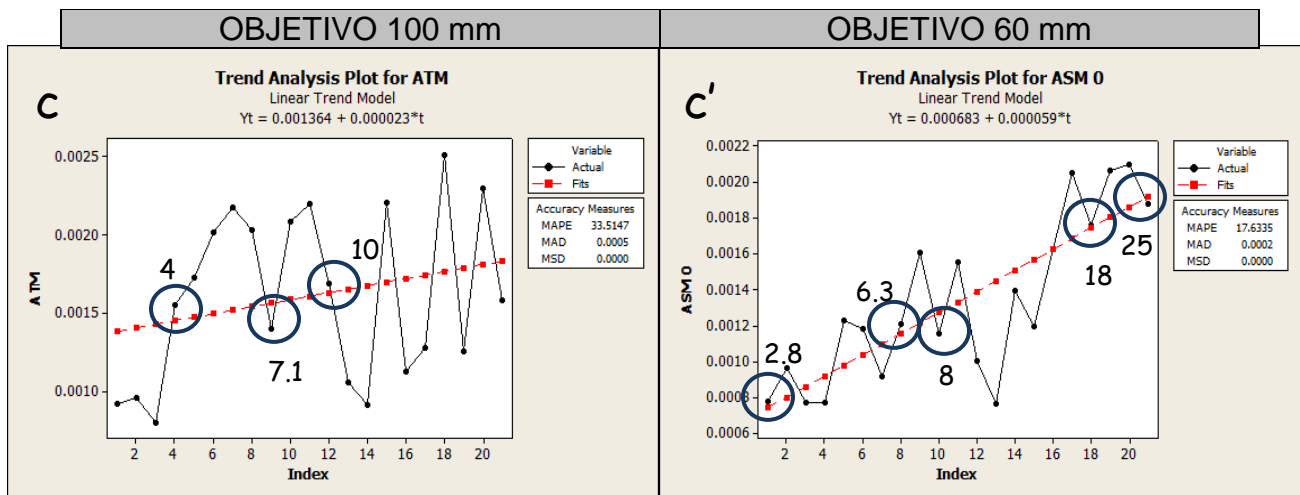


FIGURA 21. Cambios la uniformidad de imagen (ASM).

En este caso en ambos objetivos existen un mayor número de grados de apertura que se aproximan al comportamiento esperado en comparación con SOS y ET. En las tres características texturales hay mayor número de grados de apertura que se asemejan al comportamiento estadístico en un objetivo de 60 mm, esto es debido a que a mayor lejanía del objetivo focal al banco óptico existe una mayor perturbación de imagen, el control de luz debe ser mayor y por lo tanto se seleccionó un objetivo de 60 mm para las siguientes tomas fotográficas.



Se puede observar que para la característica de ASM existe un mayor número de grados de abertura que se asemejan al comportamiento esperado; no obstante, la aproximación de los valores de grado de abertura en ET es más preciso puesto que se sobreponen a la tendencia esperada, por lo tanto para la selección del grado de abertura se utiliza esta característica textural.

- Selección del Grado de Abertura

En la figura 22 se muestran los grados de abertura que se sobreponen a la tendencia esperada que fueron de 8, 13 y 20. Para una estimación general se tomaron el valor máximo y mínimo para la selección del grado de abertura determinando el coeficiente de variación en función al tiempo para seleccionar el de menor variación como grado de abertura.

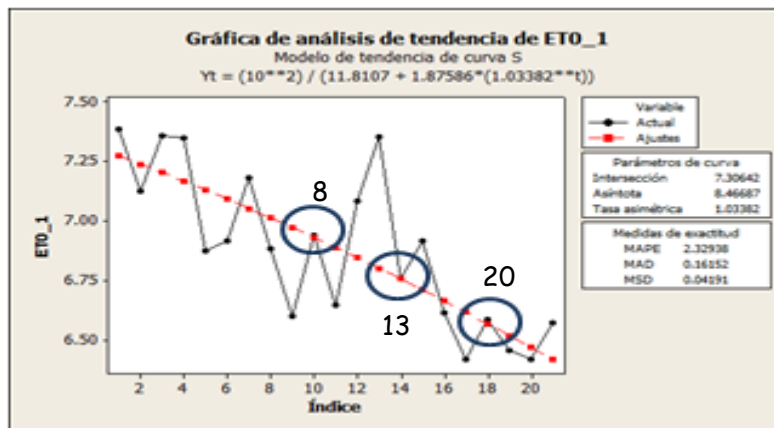


FIGURA 22. Selección del grado de abertura.

Las condiciones de prueba se muestran en la tabla 5; el tamaño de las placas de carne es diferente puesto que se utilizó un lomo de cerdo distinto, por lo que la humedad relativa y la temperatura ambiente son diferentes con respecto a las primeras pruebas de selección del objetivo focal.



TABLA 5. Condiciones de toma fotográfica para el grado de abertura.

CONDICIONES DE PRUEBA	
Placa de Carne	8 cm
Espesor	1 cm
Temperatura Ambiente	24 °C
Tiempo de Toma	30 s
Humedad Relativa	41%
Temperatura de Congelación	-27°C

En la tabla 6 se muestran los resultados de las características texturales (ASM, ET y SOS) obtenidos para esta prueba con su correspondiente análisis estadístico.

TABLA 6. Selección de grado de abertura

TIEMPO (s)	GRADO DE ABERTURA DE DIAFRAGMA					
	20			8		
	ASM	ET	SOS	ASM	ET	SOS
0	9.27E-04	7.54	501.07	7.70E-04	8.34	643.23
30	9.60 E-04	7.32	827.98	9.60 E-04	8.56	1081.23
60	8.00 E-04	8.22	817.01	7.60 E-04	8.22	1396.58
90	1.50 E-04	8.53	856.9	7.70 E-04	8.22	1244.07
120	1.70 E-03	8.77	1041.28	1.20 E-03	8.45	1041.28
150	2.00 E-03	8.81	1076.73	1.10 E-03	8.24	1032.34
180	1.10 E-03	8.07	1195.99	9.20 E-04	8.07	1195.99
210	2.10 E-03	8.61	1180.95	1.20 E-03	8.61	1298.96
240	9.31 E-04	8.47	1111.86	1.00 E-03	8.47	1235.86
\bar{x}	0.0013	8.26	956.64	0.0010	8.34	1129.95
σ	0.0005	0.5294	225.51	0.0002	0.19	219.35
C.V.	37.44	6.41	23.57	18.33	2.27	19.41



El grado de abertura de 8 tiene un coeficiente de variación menor en los tres parámetros texturales que para uno de 20, consecuentemente el grado de abertura que se selecciona para la toma fotográfica digital es de 8.

ACTIVIDAD PRELIMINAR 2. SELECCIÓN DE TOMA FOTOGRÁFICA EN CÁMARA MICROSCÓPICA

Para esta prueba, se tomaron fotos cada 30 segundos y se realizó un análisis de textura estadística donde se obtuvieron ASM, ET y SOS. Las condiciones para esta prueba se muestran en la tabla 7.

TABLA 7. Condiciones de toma fotográfica (microscopio)

CONDICIONES	
Placa de Carne	3 cm
Espesor	1 cm
Temperatura	27°C
Tiempo Toma	30 s
Humedad Relativa	38%
Temperatura de Congelación	-27°C

En la figura 23, 24 y 25 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros texturales (SOS, ET y ASM) con las 3 diferentes combinaciones de luz, brillo, gamma y saturación. Para esta prueba se realizó un análisis estadístico sobre el comportamiento de los valores individuales. El círculo de color azul es el comportamiento esperado estadísticamente y los círculos de color rojo representan el valor experimental; la mejor combinación de toma fotográfica se encuentra encerrada dentro del gráfico.

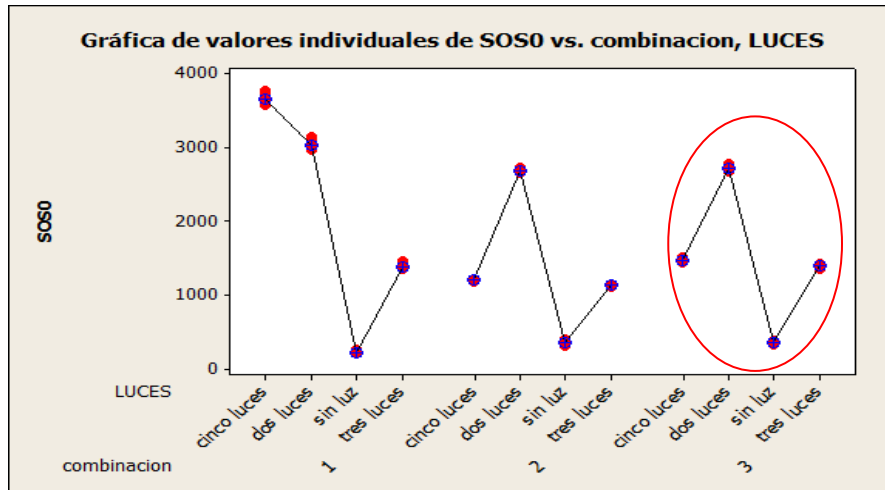


FIGURA 23. Diferencias de valores individuales en rugosidad de imagen (SOS).

Para la rugosidad de imagen (SOS) se tiene que la combinación con menor dispersión entre los valores individuales de cada toma fotográfica se encuentra en la combinación 3, de la misma forma se observa que una toma fotográfica sin luz y con tres luces otorgan valores ms aproximados al comportamiento esperado.

En la figura 24 se muestra el comportamiento de los valores individuales para el orden de imagen ET, de igual forma las mejores condiciones de los parámetros fotográficos se encuentra en la combinación 3, con una menor dispersión entre el valor experimental y el esperado.

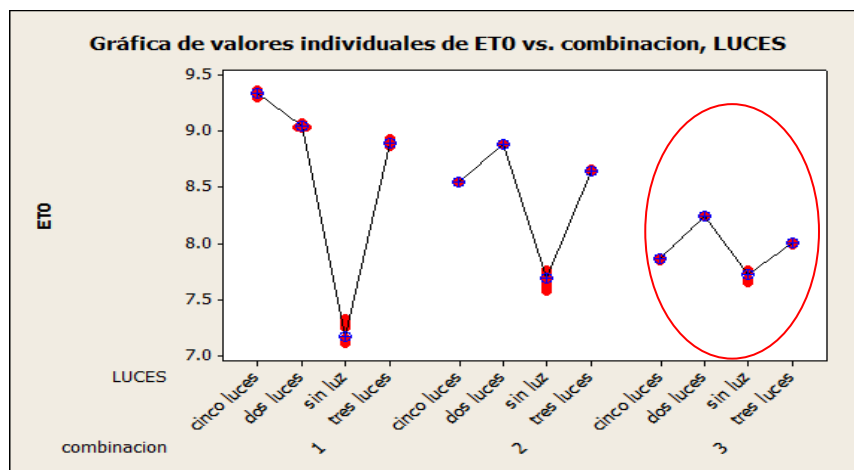


FIGURA 24. Diferencias de valores individuales en orden de imagen (ET).

No obstante, se puede observar que la toma fotográfica sin luz tienen una mayor dispersión en cuanto a las demás condiciones de luz.



En la figura 25 se observa el comportamiento de los valores individuales para la uniformidad de imagen (ASM), al igual que las anteriores características texturales, la mejor condición de toma fotográfica se encuentra en la combinación 3 y de la misma forma la mejor toma fotográfica, donde no existe variación, es la roma fotográfica con tres luces.

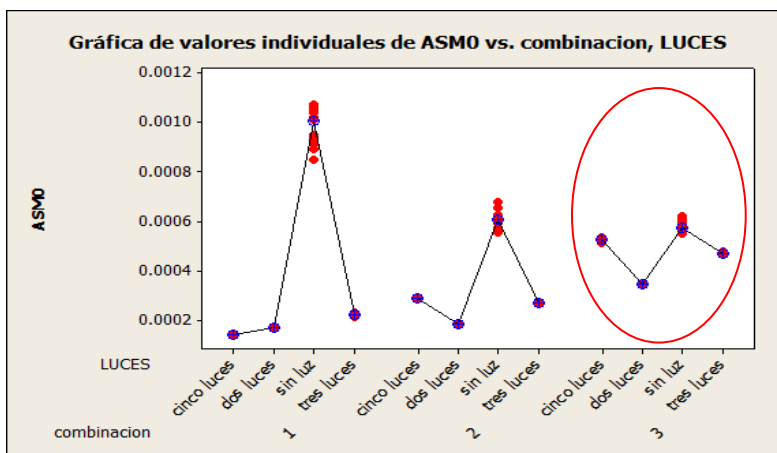


FIGURA 25. Diferencias de valores individuales en uniformidad de imagen (ASM).

Para obtener la mejor condición de luz se distinguió la diferencia que existe entre cada una de ellas en la combinación 3. Las tomas fotográficas sin luz, con dos luces y cinco luces no son aceptables en ninguna de las tres características texturales; mientras que la condición de tres luces es aceptable ya que existe una menor variación entre los valores individuales experimentales con respecto a los valores estadísticos individuales, de tal manera que las mejores condiciones para la toma fotográfica se presentan en la tabla 8.

TABLA 8. CONDICIONES DE TOMA FOTOGRÁFICAMICROSCÓPICA FINAL

Luces	Brillo	Gamma	Saturación	Zoom
3 luces	87%	2	260	8x

ACTIVIDAD PRELIMINAR 3. DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIÓN EFECTIVA

Esta prueba se realizó mediante el registro de temperaturas en la superficie de la carne almacenada en congelación (-27°C) para obtener la velocidad y el cambio de la misma durante la formación, crecimiento y fusión de escarcha.



La difusión de gases a través de los canales estrechos y tortuosos de un sólido poroso como la escarcha se produce por uno o tres mecanismos. Si el recorrido libre medio de las moléculas de gases es considerablemente mayor que el diámetro de los poros, las colisiones entre las moléculas de gas son menos numerosas que las que se producen entre dichas moléculas y las paredes de los poros. En estas condiciones la forma de transporte es la difusión de Knudsen. Si el recorrido libre medio de las moléculas del gas es menor que el diámetro de los poros, las colisiones de las moléculas de gas serán más frecuentes que las colisiones estas y las paredes de los poros, entonces se produce la difusión global ordinaria. Un tercer mecanismo de transporte existe cuando el gas se adsorbe sobre la superficie interna de un sólido poroso conocido como la difusión de superficie. (Cuevas, 2010).

En la figura 26 se muestra el comportamiento de la difusión efectiva con respecto al tiempo, como se puede observar existen tres cambios de pendiente, lo que resulta que existen tres periodos de escarchado.

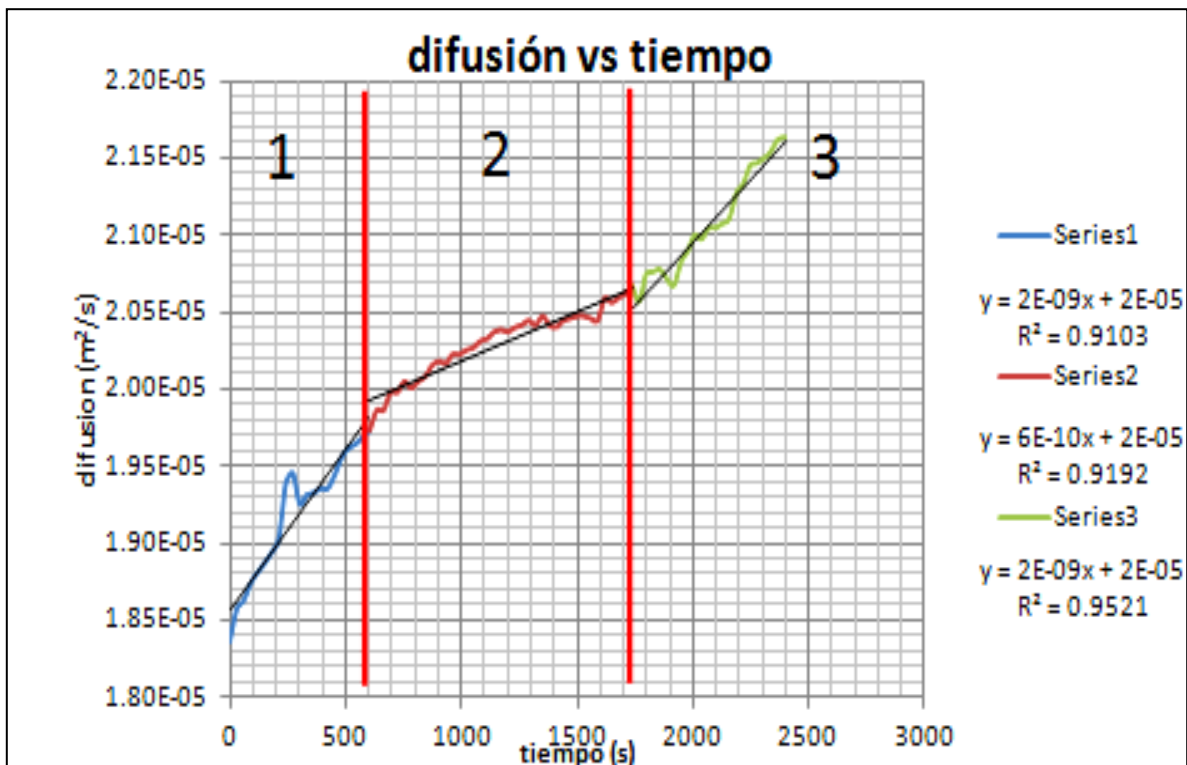


FIGURA 26. Promedio de velocidad de formación, crecimiento y fusión de la escarcha



En la primera etapa se encuentra el periodo de crecimiento de cristal; es una difusión de superficie, ya que en el comienzo de la formación de cristales sobre la superficie de la carne se da por la diferencia de temperaturas que existe y solo se da la difusión de la humedad del aire por la diferencia de presiones de vapor.

En el segundo periodo se encuentra una difusión Knudsen, ya que es el periodo de crecimiento de la escarcha, esto es una difusión tanto en los cristales de la superficie como entre los poros que se empiezan a formar y la difusión de la humedad del aire sobre la escarcha.

Y por último el periodo de crecimiento intenso de escarcha y su fusión, generándose una pendiente igual a la primera fase; sin embargo, no existe una difusión de superficie puesto que el sistema se encuentra en mayor desequilibrio (que se provoca por la deficiencia de presiones de vapor debido a la ablación), por lo tanto solo existe una difusión ordinaria que se da cuando la humedad del aire intenta encontrar el equilibrio.

En la tabla 9 se muestran los intervalos de los valores con la cual se muestra la velocidad de transferencia de la humedad del aire a la superficie de la carne provocando la formación de escarcha, lo que significa que es una velocidad de transferencia de humedad lenta en comparación a otros sistemas.

TABLA 9. Valores de la difusión efectiva en el proceso de escarchado.

PERIODO	INTERVALOS DE $Deff$ (m^2/s)	GRADIENTE
I	1.84E-5	1.3E-5
	1.97E-5	
II	1.97E-5	9E-7
	2.06E-5	
III	2.06E-5	1E-6
	2.16E-5	



Esta determinación de la pendiente se debe al tiempo en que se encuentra un cambio en los periodos de formación, crecimiento y fusión de escarcha que fue posible visualizar mediante la toma fotográfica como se muestra más adelante en la figura 27.

OBJETIVO PARTICULAR 1. DETERMINACIÓN DE ENTROPÍA ESTADÍSTICA.

Se sometieron las placas del lomo de cerdo a congelación con una temperatura de -27°C durante un periodo de 15 y 30 días; posteriormente se tomaron fotografías de manera digital y microscópicamente cada 30 segundos. Las condiciones para la toma fotográfica fuera de la cámara de congelación se muestran en la tabla 10 para ambas cámaras.

TABLA 10. Condiciones de toma fotográfica para 15 días.

CONDICIONES		
	DIGITAL	MICROSCOPIO
Peso de Carne	75.49 g	73.67 g
Espesor	1 cm	1 cm
Temperatura Ambiente	24 °C	27°C
Humedad Relativa	41%	39%
Temperatura de Congelación	-27°C	-27°C

Mediante el programa *Open CV* se obtuvieron el valor de entropía estadística con respecto al tiempo de toma fotográfica. En la figura 27 se muestra el comportamiento de la entropía estadística con respecto al tiempo para 15 días de almacenamiento.

Se puede notar que existen tres cambios en los valores de entropía, con lo que se corroboran los periodos de formación, crecimiento y fusión de escarcha, de la misma forma que en los cambios de pendiente de la difusión efectiva. Consecuentemente, a la velocidad de formación, crecimiento y fusión de escarcha se le otorgan cambios texturales con respecto a la entropía estadística.



Esto significa que por cada periodo de escarchado en la superficie de la carne se obtiene un cambio en la textura estadística.

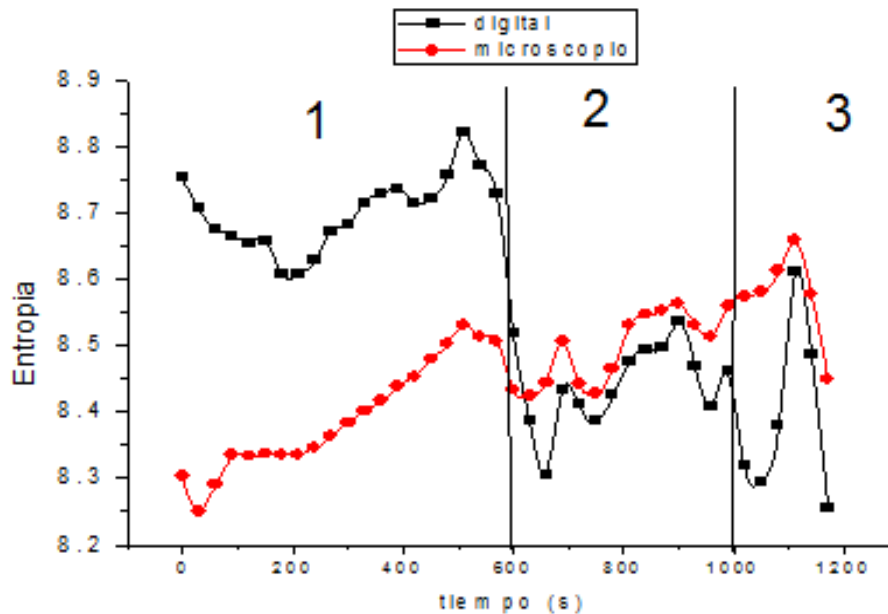


FIGURA 27. Entropía estadística respecto al tiempo de 15 de almacenamiento

En el primer periodo hay una diferencia de valores entre la cámara digital y el estereomicroscopio, esto se debe a que existe un mayor contacto con el aire del ambiente en la cámara digital, lo cual provoca un mayor crecimiento de cristales sobre la superficie; su crecimiento es más homogénea en toda la superficie de la carne como se muestra en la figura 28.

Al momento de la pixelación las tonalidades de grises se encuentran en un mayor orden y el valor de la entropía es menor que en cámara microscópica, lo que significa que la probabilidad de la localización de un pixel de igual tono se encuentre junto a otro de la misma tonalidad es mayor en la toma fotográfica con la cámara microscópica.

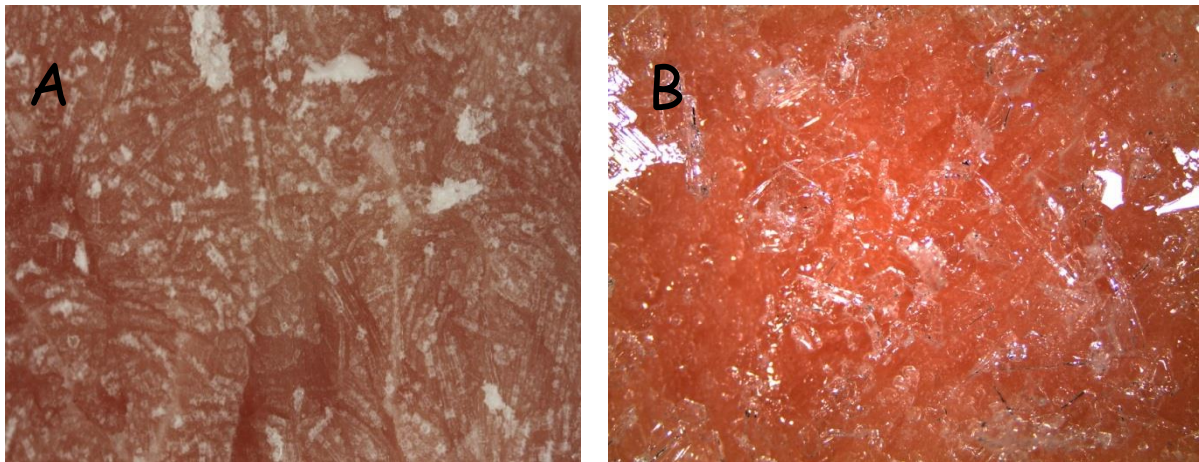


FIGURA 28. Formación de crecimiento de cristal. A cámara digital, B cámara microscópica
En el siguiente periodo los valores son similares entre las dos diferentes tomas fotográficas puesto que llega el momento de crecimiento de escarcha, donde ya la superficie se encuentra totalmente cubierta de cristales y empieza la sobre posición de los mismos, como se puede observar en la figura 29.

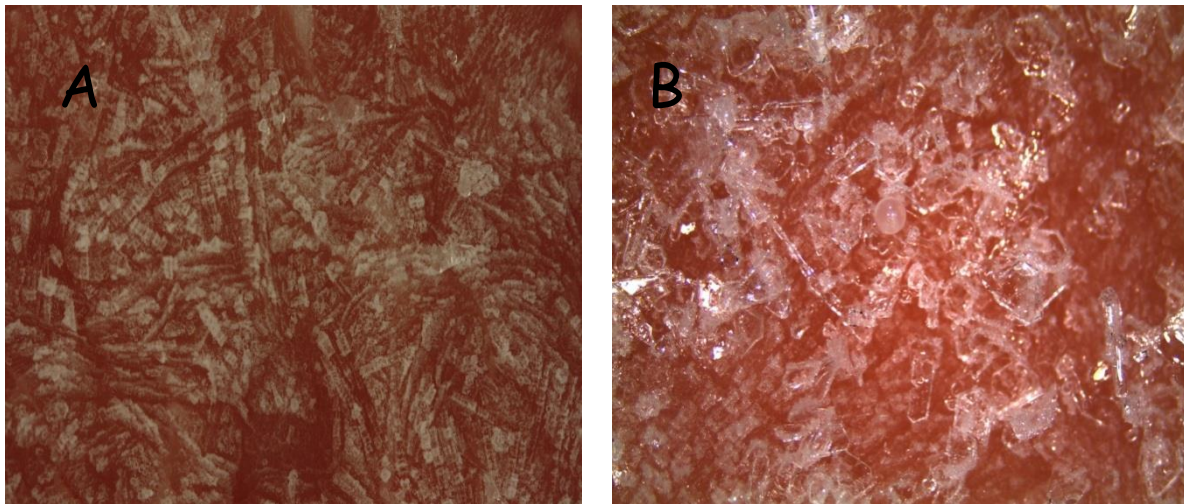


FIGURA 29. Periodo de crecimiento de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica

Esta comparación (figura 29) denota que aproximadamente toda la superficie de la carne está cubierta por escarcha, por lo tanto en el momento de la pixelación las tonalidades de grises obtienen un orden homogéneo y los valores de entropía estadística permanecen en un comportamiento aparentemente constante.

Y por último se tiene el tercer periodo de crecimiento intenso, correspondiente a la fusión de escarcha, donde los valores de entropía siguen un comportamiento



diferente, debido a que la ramificación de la escarcha depende de la humedad del aire, esta variable se monitorea durante el proceso de escarchado obteniendo una humedad relativa promedio de 39%.

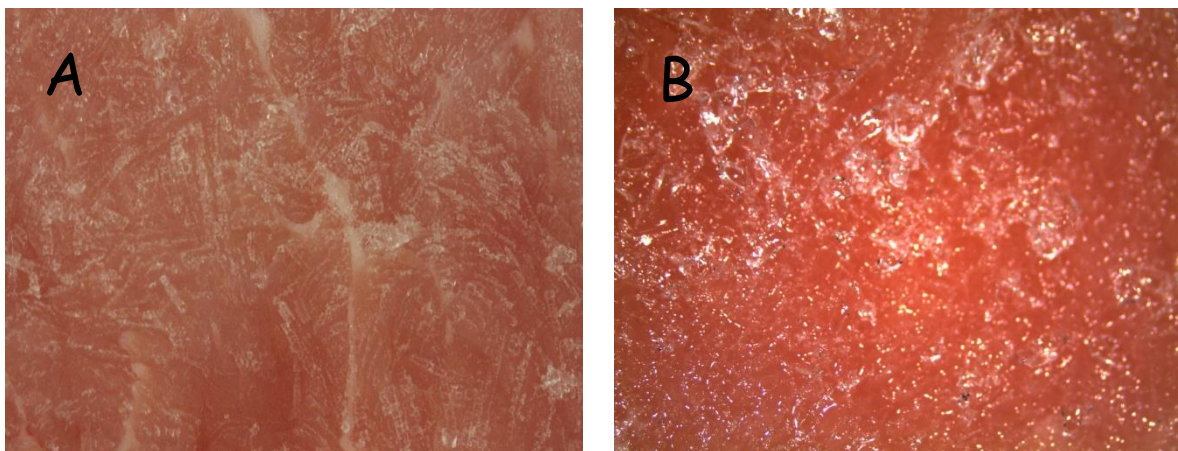


FIGURA 30. Periodo de crecimiento y fusión de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica

Como se observa en la figura 30, existe un cambio en el color de la fotografía, lo cual se puede atribuir a un daño físico o un cambio en la reflexión de la luz debido al crecimiento de cristales y a la fusión de estos.

En la tabla 11 se muestran las condiciones con las cuales se realizó la experimentación para 30 días de almacenamiento.

TABLA 11. Condiciones de toma fotográfica para 30 días.

CONDICIONES		
	DIGITAL	MICROSCOPIO
Peso de carne	76.15 g	75.82 g
Espesor	1 cm	1 cm
Temperatura ambiente	21.8 °C	27 °C
Humedad Relativa	46.4%	41.6%
Temperatura de congelación	-27°C	-27°C



En la figura 31 se muestra el gráfico de entropía estadística con respecto al tiempo para 30 días de almacenamiento, donde se observa que también existen los tres periodos. Sin embargo, el comportamiento en la toma fotografía por medio del microscopio es debido a que la carne sufrió pequeñas quemaduras por frío, generando una superficie rugosa y provocando así que el primer periodo de formación del cristal ocurra en un menor lapso de tiempo y no existan diferencias entre los periodos de escarcha, por lo tanto a 30 días de almacenamiento la difusión superficial no es muy notoria.

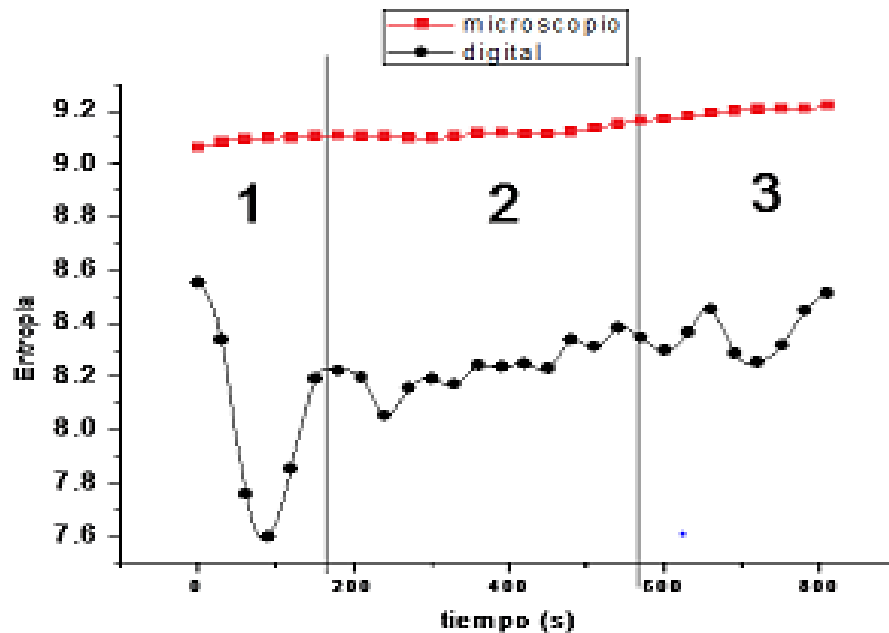


FIGURA 31. Entropía estadística respecto al tiempo para 30 días de almacenamiento

En el primer periodo en la cámara digital se observa un gran salto con respecto a los valores de entropía y en cámara microscópica solo se ve un pequeño incremento.

En la figura 32 se muestra que a una mayor humedad relativa el proceso de difusión superficial pasa en un lapso de tiempo corto, lo que provoca ese cambio entre los valores de entropía y por consiguiente en la primera toma fotográfica se observa que la superficie de la carne ya posee escarcha.

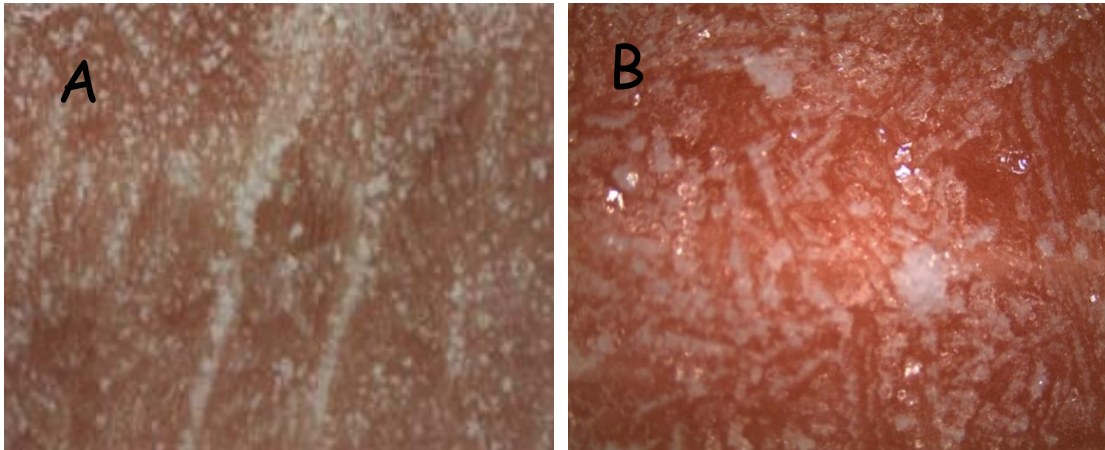


FIGURA 32. Periodo de crecimiento del cristal. A cámara digital, B cámara microscópica.

En el segundo periodo de crecimiento de escarcha que se observa en la figura 33, el comportamiento de la entropía es aproximadamente constante. En ese intervalo de tiempo se corrobora que el aumento de escarcha es mayor y por lo tanto los valores de entropía estadística no cambian significativamente.

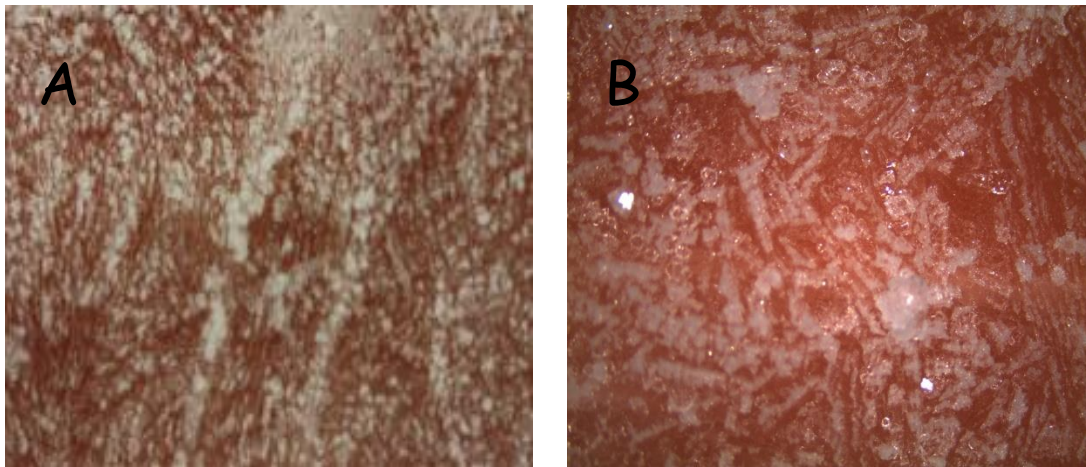


FIGURA 33. Periodo de crecimiento de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica.

Este comportamiento de los valores de entropía se debe a que la superficie de la carne está completamente escarchada y por lo tanto al momento de la pixelación la tonalidad de grises no tiene mucha variación.



Y por ultimo tenemos el tercer periodo donde se funde la escarcha. En la figura 34 se muestran las imágenes que corresponden a ese periodo, donde la superficie de la carne se encuentra completamente libre de escarcha.

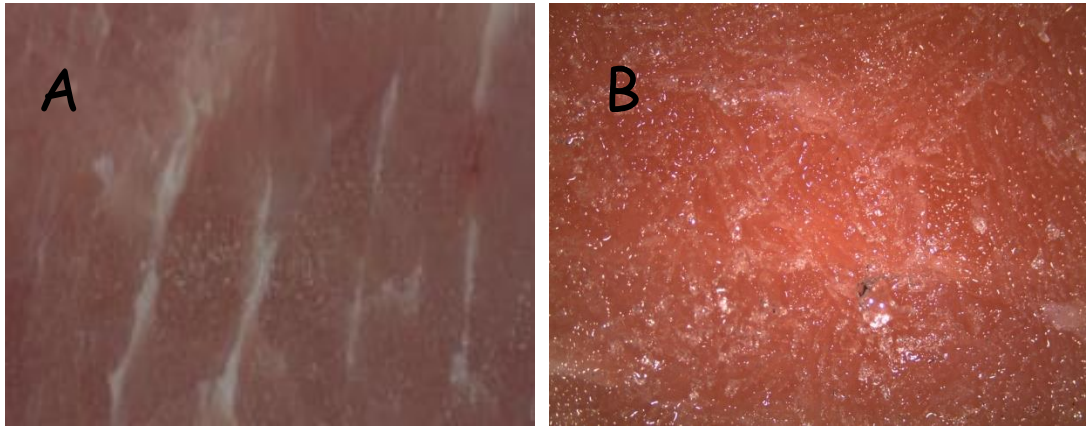


FIGURA 34. Periodo de crecimiento intenso y fusión de escarcha. A cámara digital, B cámara microscópica.

En la figura 35 se muestra las diferencias que existen entre los valores de entropía estadística tanto en cámara microscópica y digital así mismo con respecto al tiempo de almacenamiento.

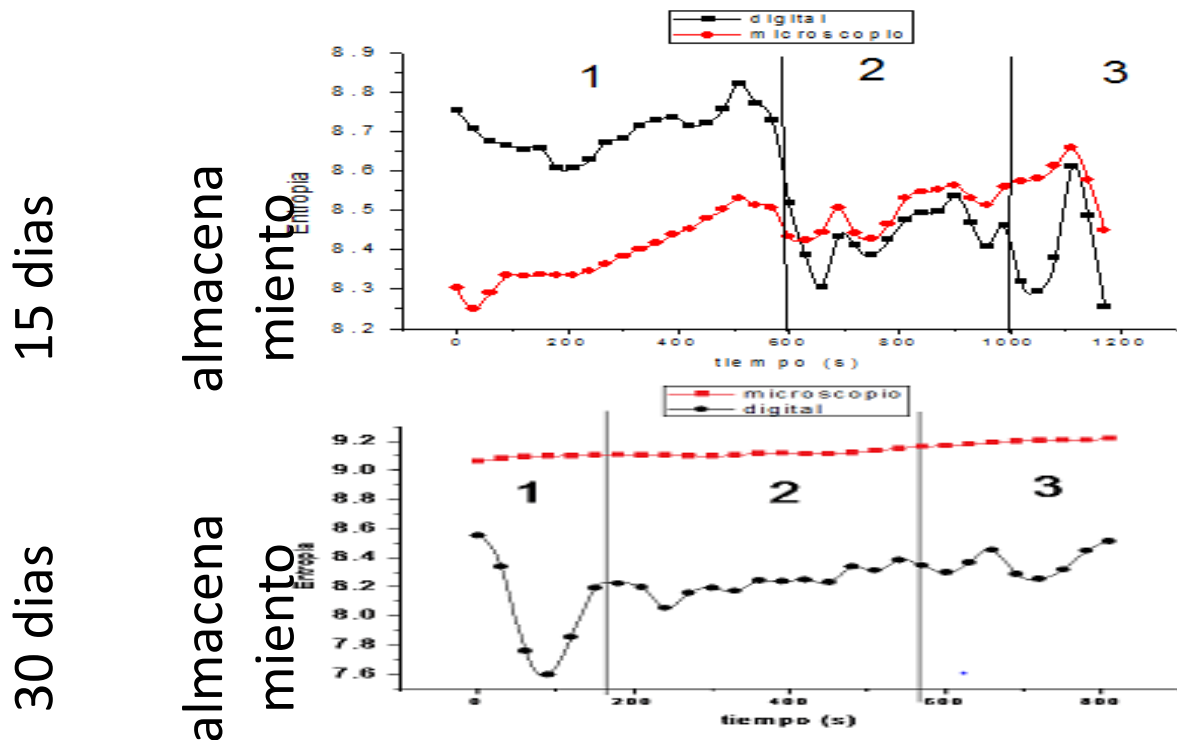


FIGURA 35. Comparación de entropía estadística (15 y 30 días de almacenamiento).

Comparando los días de almacenamiento (figura 35) y las condiciones ambientales a las cuales se trabajó, se nota una diferencia entre los valores de la entropía estadística. Claramente se puede observar que para 15 días de almacenamiento los gradientes cambian en forma fraccional con respecto a las dos cámaras; mientras que para 30 días de almacenamiento el gradiente de la entropía es mayor a las unidades en el primer periodo.

Los cambios que existen en los valores de entropía se deben a que el proceso de formación, crecimiento y fusión de escarcha no es similar por las condiciones ambientales, un gran cambio de los valores de intensidad de tonalidad puede indicar un cambio en la estructura geométrica (Zheng, 2006).

Así mismo existe un daño provocado por el proceso de escarchado en la superficie de la carne debido a que los valores de entropía no regresan al valor inicial en el momento de la fusión total de la escarcha. Existen variaciones de tonalidades de grises debido a la pérdida de agua en la carne provocada por la ruptura de los tejidos superficiales.



Para poder seleccionar los valores reales del proceso de escarchado mediante la textura estadística (entropía estadística en la formación, crecimiento y fusión de escarcha), se realizó una comparación de imágenes de la cámara digital y la cámara microscópica como se muestra en la figura 36 y 37 se observan las diferencias en tonalidades.

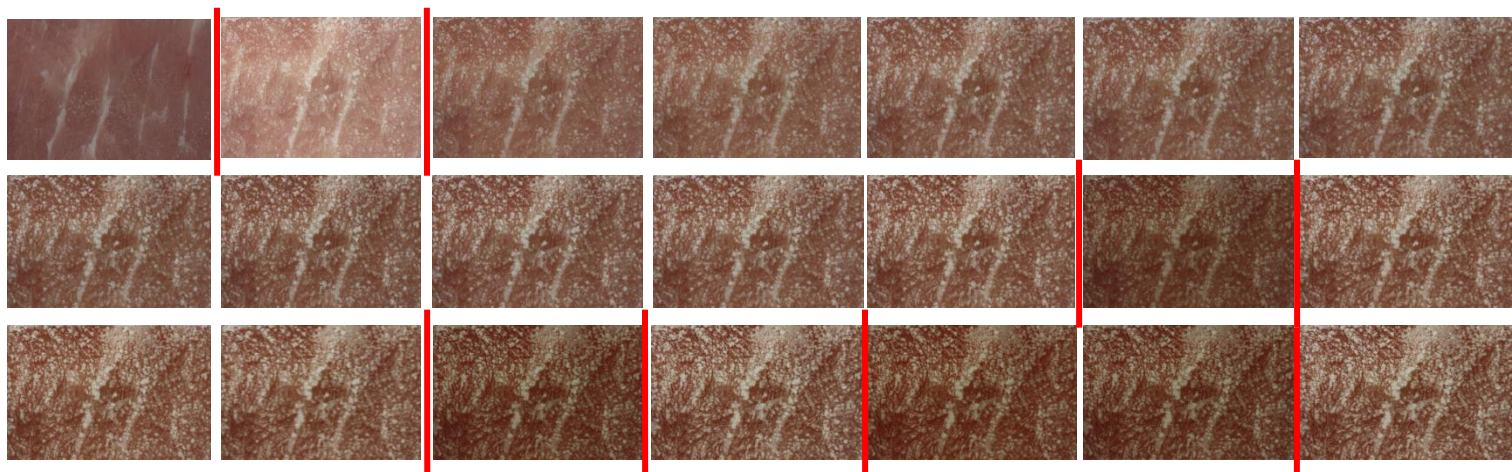


FIGURA 36. Toma fotográfica (cámara digital)

En la figura 36 las líneas de color rojo indican los cambios de luz que existen entre las tomas fotográficas, lo cual causa modificaciones en las características texturales, ya que al momento de pixelear la imagen el cambio de tonalidades en escala de grises varía con respecto al color de la fotografía; por lo tanto, el valor de entropía no es propiamente del proceso de escarchado si no involucra el efecto de la luz en la imagen.

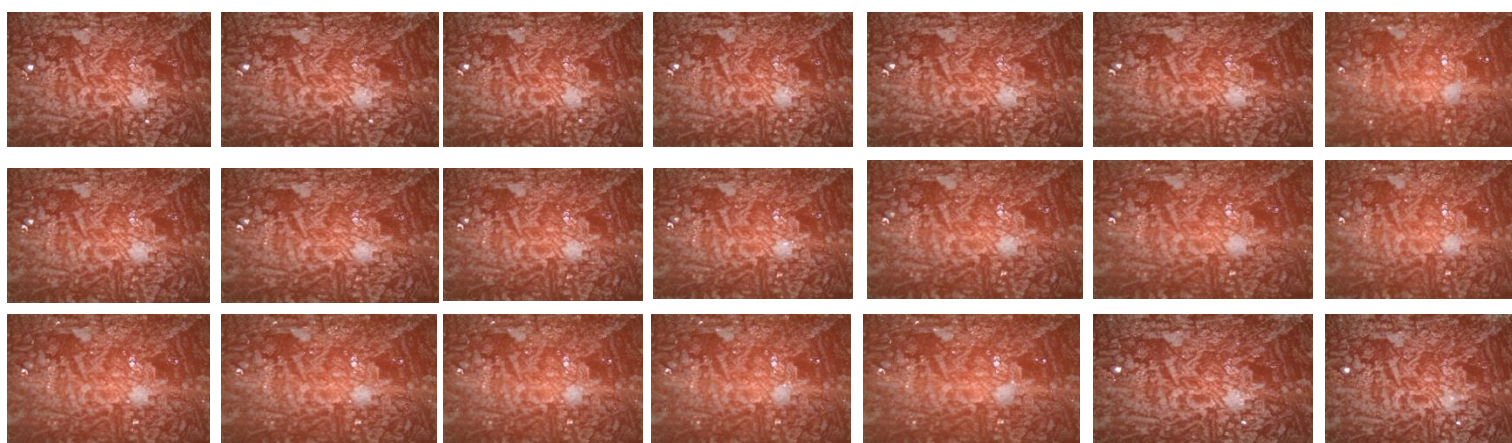


FIGURA 37. Toma fotográfica (cámara microscópica)



En la figura 37 se observa que no existen cambios de tonalidades en las imágenes, lo que indica que el cambio en los valores de entropía estadística es debido a la formación, crecimiento y fusión de escarcha.

El uso de cámara digital para este tipo de estudios no es la adecuada debido a los cambios que existen entre las fotografías, además conlleva un mayor tiempo de experimentación en lo que es el acomodo de todos los instrumentos.

El uso de una cámara microscópica funciona de una forma idónea, porque no existen variaciones entre las tomas fotográficas puesto que se puede regular el brillo, gamma y la saturación de la imagen teniendo un mayor control.

OBJETIVO PARTICULAR 2. DETERMINACIÓN DE LA ENTROPÍA TERMODINÁMICA

Se sometió el lomo de cerdo a congelación a una temperatura de -27°C durante un periodo de 15 y 30 días; posteriormente, fuera de la cámara de congelación se registró la toma de temperaturas en tres diferentes zonas de la carne (figura 38) cada 30 segundos.

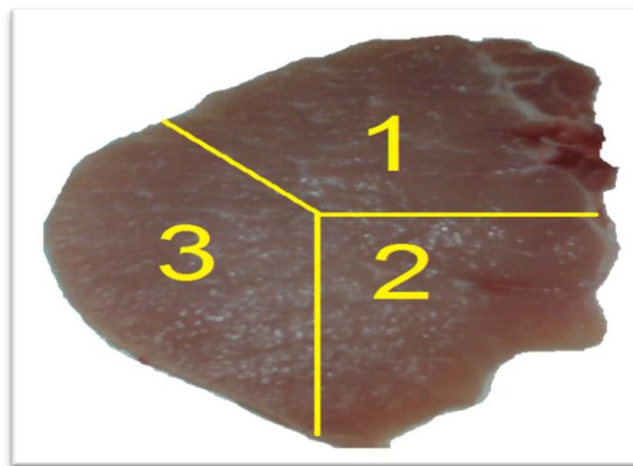


FIGURA 38. Zonas de registro de temperaturas

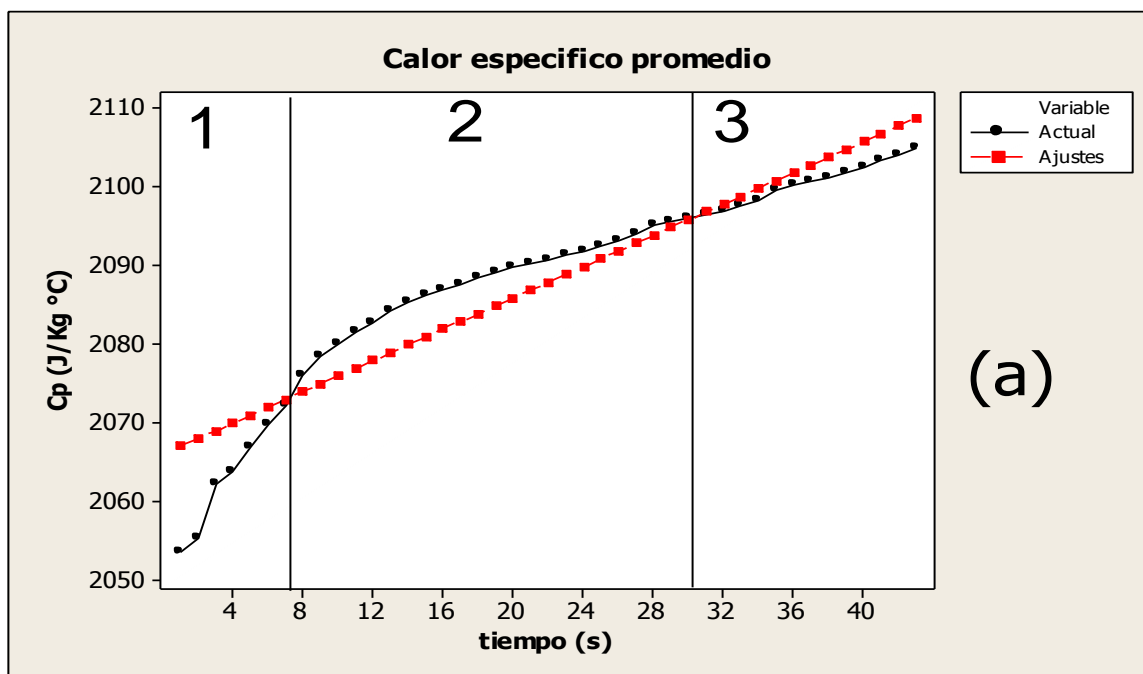


Las condiciones de prueba se muestran en la tabla 12.

TABLA 12. Condiciones de prueba 15 y 30 días

CONDICIONES		
	15 DÍAS	30 DÍAS
Peso de Carne	57.19 g	77.32 g
Espesor	1 cm	1 cm
Temperatura Ambiente	23 °C	25 °C
Humedad Relativa	41%	42%
Temperatura de Congelación	-27°C	-27°C

En la figura 39 se observa el comportamiento del calor específico en el proceso de formación, crecimiento y fusión de escarcha durante los 15 y 30 días de almacenamiento.



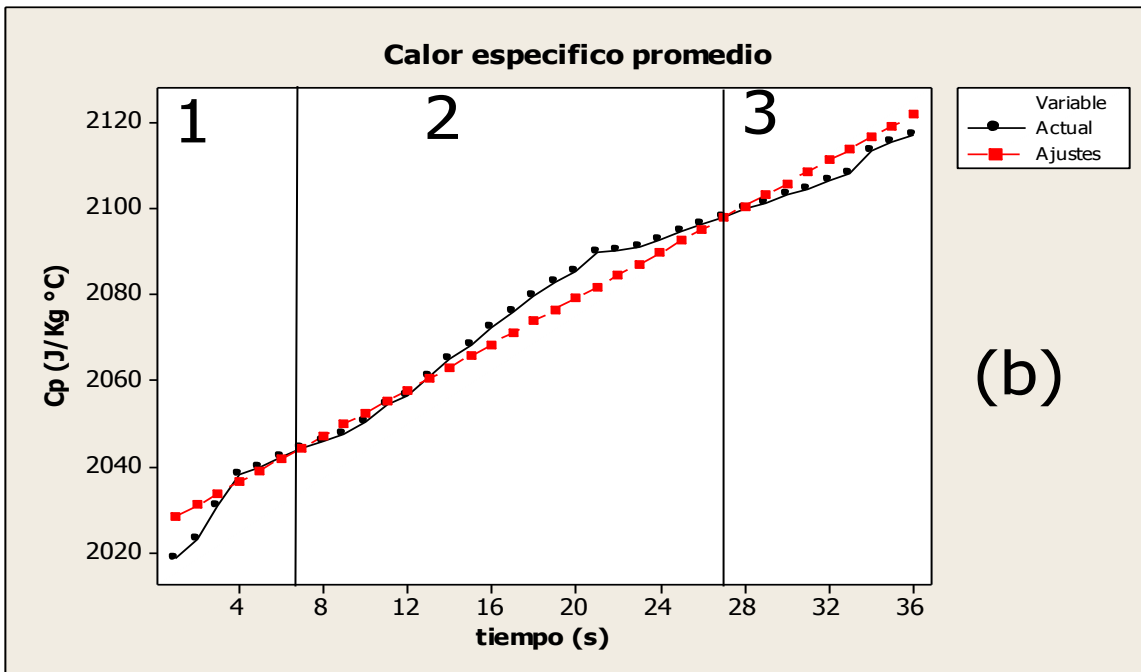


FIGURA 39. Calor específico durante el proceso de escarchado. (a) 15 días, (b) 30 días de almacenamiento. El cambio de calor específico con respecto al tiempo muestra la cantidad de energía que requiere para que se genere escarcha en la superficie de la carne; conforme aumenta la temperatura, el Cp incrementa con ella puesto que depende de la temperatura a la que se encuentre.

En la figura 39 se pueden notar las tres etapas de la escarcha tanto en 15 y 30 días de almacenamiento. La formación del cristal (etapa 1) necesita mayor cantidad de energía, por lo cual los datos puntuales en esta etapa se encuentran alejados uno del otro debido a que empieza el cambio de fase; posteriormente en la etapa 2 donde se encuentra el periodo de crecimiento de la escarcha los valores del Cp otorga una curva más prolongada, puesto que el sistema se encuentra en un mayor desequilibrio térmico; consecuentemente los valores de Cp se incrementande forma significativa. En la etapa 3, donde empieza la fusión de la escarcha, el Cp regresa a un comportamiento aparentemente lineal aunque el valor sigue incrementando, puesto que ocurre una vez más otro cambio de fase.

Estos cambios de calor específico en los tres periodos de escarchado en la superficie de la carne se deben a la energía de activación de las moléculas que se van depositando, ya que la velocidad con la que ocurre esta deposición no es igual

Ea. vs tiempo





en todos los puntos y así el sistema se encuentra en un desequilibrio termodinámico.

En la figura 40 se observa el comportamiento de la energía de activación con respecto al tiempo, donde aproximadamente de los 0 a los 400 segundos se observa el periodo de inicio de la formación del cristal en la superficie de la carne y se requiere una mayor energía para poder llegar a la ablimentación; entre los 400 y 900 segundos empieza la formación de escarcha donde se encuentra ya un sólido poroso, por lo cual solo por la diferencia de presiones se van a ir generando las capas de escarcha y no existe un cambio de energía considerable, simplemente permanece a tasa casi constante. Después de los 900 segundos empieza un incremento ligero en la energía de activación debido a que los cristales de hielo formados por la escarcha empiezan a deshielarse, lo que ocasiona una fusión y por lo tanto un incremento de energía.

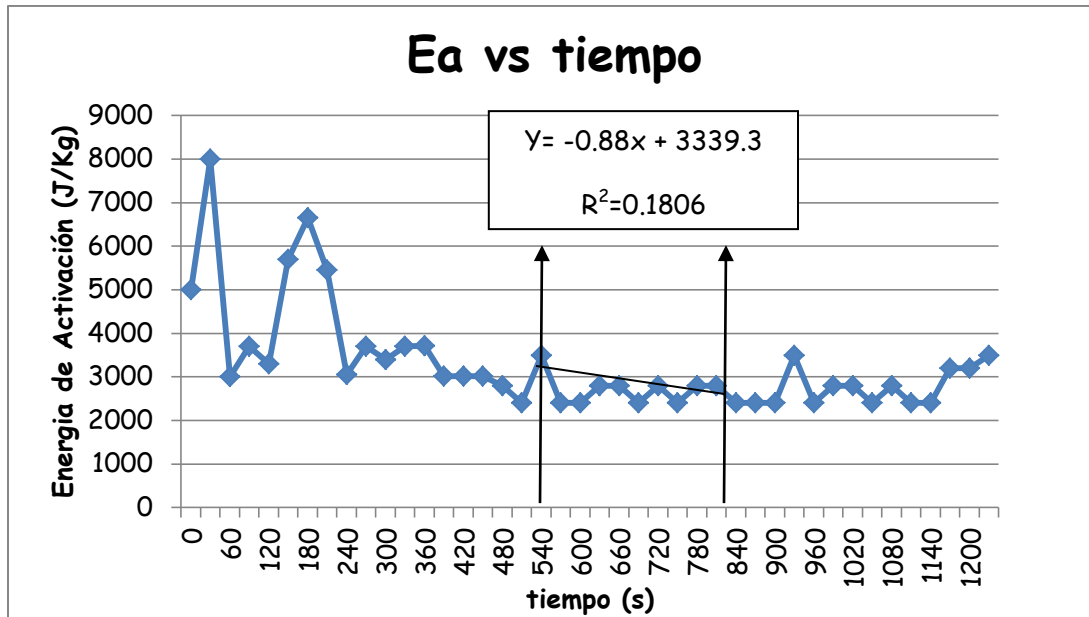


FIGURA 41. Energía de activación para 30 días de almacenamiento

En la figura 41 se encuentra el comportamiento de la energía de activación con respecto al tiempo para 30 días de almacenamiento; de igual manera se encuentran los tres periodos de escarchado donde los cambios en los valores de la energía de activación son similares en comparación con 15 días de almacenamiento. Existen pequeñas fluctuaciones en el periodo de 400 a 800 segundos en almacenamiento a 30 días, donde ocurre el crecimiento de escarcha; en este periodo el valor de la energía de activación debería permanecer constante debido a que la transferencia de masa ocurre solo por diferencial de presiones que hay entre los poros. Sin embargo estas fluctuaciones pueden ser despreciables ya que el valor de la pendiente solo varía en 0.6 y por consiguiente los datos son confiables.

En la figura 42 se observan los cambios de entropía termodinámica en la formación, crecimiento y fusión de escarcha.

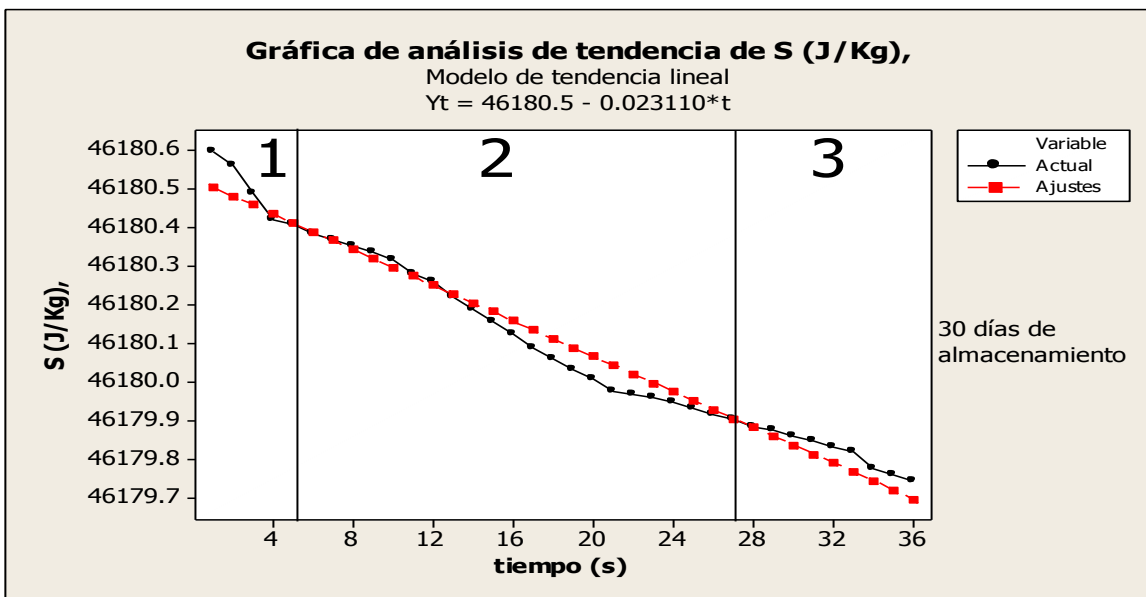
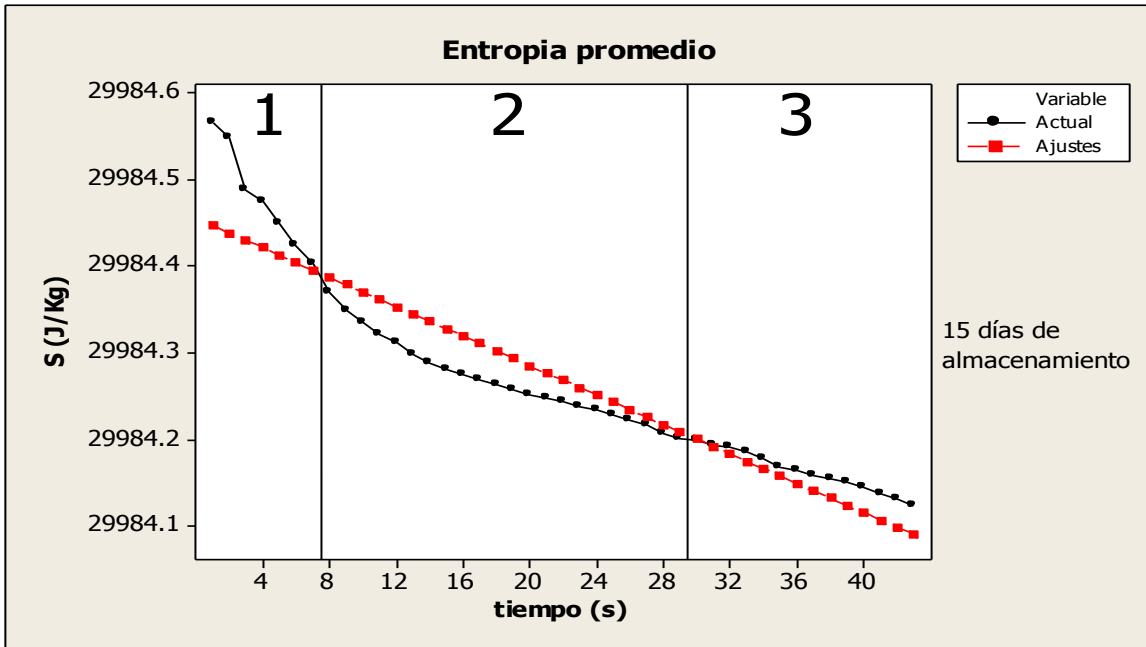


FIGURA.42. Entropía termodinámica

En el cambio de entropía durante el proceso de escarchado en la superficie de la carne se tiene una pendiente negativa, debido a que la determinación de estos valores se obtuvieron a través del registro de temperaturas en la superficie de a carne y dado que la entropía es una propiedad inversamente proporcional a la temperatura; sin embargo, también se distinguen las tres fases existentes de la escarcha.



En el gráfico para 15 días de almacenamiento (figura 42) tanto el primer y segundo periodo tienen un requerimiento energético mayor durante la formación del cristal provocado por el cambio de fase, ya que al pasar la humedad del aire y sobreponerse en la superficie de la carne, genera un desorden energético en el sistema y consecuentemente un desequilibrio termodinámico.

Si se comparan los valores de entropía para los dos tiempos de almacenamiento se puede observar una diferencia significativa entre estos, pues a un mayor tiempo de almacenamiento la carne empieza a deshidratarse por el efecto de la congelación, más rugosa convirtiendo la superficie de la carne, lo que conlleva a que para que exista un acomodo del cristal sobre esta superficie se necesita una mayor cantidad de energía. En el segundo periodo se tiene un cambio de la pendiente para obtener el tercer periodo para 30 días de almacenamiento; esto significa que el desequilibrio provocado por el primer periodo es compensado, ya que la superficie al ser más rugosa se comporta como un sólido poroso como lo es la escarcha, por lo tanto el diferencial de presiones de vapor es mayor y consecuentemente el proceso de crecimiento de escarcha y la transferencia de masa aumentan considerablemente, lo cual provoca un mayor espesor. Por lo tanto en el proceso de fusión de escarcha se genera un incremento en la entropía por el cambio de fase mayor que en 15 días de almacenamiento.

CONCLUSIONES

El proceso de formación, crecimiento y fusión de escarcha genera daños texturales en la superficie de la carne, que dependen de la velocidad con la cual se sobrepone en esta misma, esto se debe a la ramificación e interconexión de los cristales de hielo, debido a que por cada capa de escarcha que se genera existe un incremento en la velocidad de crecimiento, da como resultado una matriz de



hielo sólido y poros llenos de aire húmedo y por lo tanto una transferencia de masa y modificaciones en la estructura arbórea de la escarcha.

Por cada modificación en la estructura de la escarcha se le puede atribuir un daño en las fibrillas superficiales de la carne, que se torna más porosa y por lo tanto existe un mayor exudado y al final de la fusión de escarcha una pérdida en el color.

Estas modificaciones en la estructura de la carne conlleva a cambios termodinámicos, ya que el vapor de agua ablimado genera un diferencial de presiones y un desequilibrio en la superficie, ya que que al ser un material poroso influye en el primer periodo de formación del cristal de escarcha.

El periodo de escarchado depende de las características del material, la humedad relativa así como la temperatura ambiente, ya que a una mayor humedad en el ambiente existe un mayor crecimiento de escarcha provocando un desequilibrio térmico y generando un daño textural en la superficie del lomo de cerdo.

La medición del cambio en la superficie de la carne mediante la textura estadística durante la formación, crecimiento y fusión de escarcha es factible cuando se utiliza una cámara microscópica, ya que existen menores perturbaciones en las imágenes al momento de su pixelación en las tonalidades de grises.

Existen transformaciones estructurales mínimas cuando el lomo de cerdo llega a la estabilidad de fases, es decir, hasta el momento en que el proceso de fusión de escarcha termina, estas modificaciones en la estructura son provocados por los tres periodos existentes en la escarcha, lo cual se relaciona con el cambio en la textura de imagen y el cambio en las propiedades termofísicas de la escarcha.

Coexisten la transferencia de energía y la transferencia de masa en el proceso de escarchado, ya que la difusión de la escarcha depende de la energía de activación que tienen las moléculas y el desequilibrio térmico en las capas de escarcha.

El problema y los objetivos de este proyecto han sido resueltos satisfactoriamente al encontrar los tres periodos de escarchado (formación, crecimiento y fusión)



mediante la textura estadística, el cambio en propiedades termodinámicas y la velocidad con la que se transfirió la humedad existente en el aire hacia la superficie de la carne, debido a que en un tiempo transcurrido existen en las tres diferentes formas de monitoreo un cambio en las pendientes de los gráficos lo que muestra que el proceso se lleva en tres etapas y existe una relación análoga en los tres diferentes tipos de estudio.

REFERENCIAS

1. AFNOR, F., 1991. Control de la calidad de productos alimentarios. Analisis sensorial. Limusa 4 edicion, Paris, pp. 387.
2. AHMET, Z. S., 2000. Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth, period. Heat and Mass Transfer. Vol. 43, 539-553.
3. ALARCON, C. J., 1998. Tratado practico de refrigeracion automatica. Editorial Marcombo, España, pp. 485.



4. AMERLING, C., 2004. Tecnología de la carne. Editorial Gandhi, Berlin, pp. 114.
5. BADUI, D. S., 2006. Química de los alimentos. Editorial Pearson, Naucalpan de Juárez, Mexico, pp. 639.
6. BALL, W. D. Physical Chemistry. Editorial Thompson, USA, pp. 649.
7. BERTRAND, M., GUY, E. M., STAMPLFER, R., ETHIER S., 1992. Texture analysis of ultrasound B-mode images by segmentation. Ultrasonic Imaging. Vol. 6, 262-277.
8. BEVCK, M., KONOKENKO, I., 2002. A statistical approach to texture description of medical images: a preliminary study. In 15th IEEE symposium on computer-based medical systems (CBMS'02). Maribor, Slovenia.
9. CALLEN. H., 1985. Thermodynamics and a introduction to thermostatics. Editorial Mc-Graw Hill, NY., USA.
10. CHEN, XD. CHEN P., 1987. Freezing of aqueous solution in a simple apparatus designed for measuring freezing point. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 46. 1199-1213.
11. COULSON, J.M., RICHARDSON, J. F., 1984. Ingeniería Química. Diseño de reactores químicos, ingeniería de la reacción bioquímica control y métodos de cálculo con ordenadores. Editorial Reverte. Barcelona, España, pp. 777.
12. CUEVAS, G. R., 2010. Transferencia de masa y energía interna. UNAM, Mexico.
13. DE LA PEÑA, R. 1981. Analisis ingenieril de los procesos quimicos. Editorlal Limusa, Mexico, pp. 1981.
14. DELGADO, J., OCHOA, O., AMEZQUITA, A., CHEJNE, F., Thermophysical properties of meat. Food Sciencie & technology. Vol. 45. 245-253.
15. DESOUZART, 2011. Oportunidades para el mercado de carnes de cerdo, URPJ. Org.
16. FAIRES, M. V., 1999. Termodinamica. Editorial Limusa, Mexico D.F. pp. 768



17. FERNANDEZ, L. CASTILLERO, C. AGUILERA, J.M., 2003. An application analysis to dehydration of apple disc. *Journal Food Engineering*. Vol. 67, 185-193.
18. GATICA, J., PITA, V., 2000. Correlacion para factores que intervienen en el proceso de formacion de escarcha. 8º Congreso iberoamericano de ingenieria quimica.
19. GATICA, J.A., PITA, V., 2009. Simulacion del deposito de escarcha en superficies fria. Universidad Federal del Rio de Janeiro.
20. GENOT, G., 2003. Congelacion y calidad de la carne. Editorial Acribia, Zaragoza España. Pp. 635.
21. GRUDA, Z. 1986. Tecnologia de la congelacion de los alimentos. Editorial Acribia, España, pp. 798.
22. HARALICK, R. M., DO, G. S., GUIGNOT, M., 1973. Statistical an structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 67, 786-804.
23. HERNANDEZ, D., GARCIA, J., CRUZ, J., ARJONA, J., MELENDEZ, R. 2009 Texture analysis of freezing meat samples on grid environment. *Proceedings of the second EELA-2 Conference*.
24. HERNANDEZ, H. I., 2011. Determinacion de la capacidad antioxidante en carne de abasto, UNAM, Mexico D.F.
25. JACKMAN, P. 2009. Comparison of the predictive power surface wavelet texture features at high and low magnification. *Meat Science*. Vol. 82. 353-356.
26. JAYAS, D.S., PALIWAL, J., VISEN, N.S., 2000. Multi-layer neural networks for image analysis of agricultural products. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 26, 119-128.
27. KANDULA, M., 2011. Frost growth and densification in laminar flow over flat surfaces. I. *J. Heat and Mass Transfer*. Vol. 54, 1719-1731.
28. LAGUERRE, O. FLICK, D. 2007. Frost formation products preserved in domestic freezers. *J. Food Eng*. Vol. 79, 124-136.



29. LEE, Y. B., 2005. Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 41. 175-183.
30. LEVENSPIEL, O., 2005. *Chemical Reaction Engineering*. Editorial John Wiley, New York, pp. 452.
31. LUER, H., BEER. 2000. Frost deposition in a parallel plate channel under laminar flow conditions. *Science Thermal*. Vol. 39. 85-95.
32. LE GALL, J. M., GRILLOT, C. J., 2007. Modeling of frost growth and densification. *Journal Heat Mass Transfer*. Vol. 40. 3177-3187.
33. MACKIE, I. C. 1993. The effects of freezing of flesh proteins. *Food Rev*.
34. MALLET, C. P., 1998, *Frozen food technology*. Blackie Academic & Prof.
35. MORGAN, D. J., CRONIN, D. C., LYNNG J.G. 1978. Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blend over a temperature range of -18 to +10°C. *Meat Science*. Vol. 79, 740-747.
36. MULLET, A., GARCIA, R., BON, J., BERNA, A. 2000. Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*. Vol. 18, 1201-1219.
37. PARDO, J. M., 1998, An investigation in to the relationship between freezing rate and mean ice crystal size for coffee extracts. *Trans Icheme*. Vol. 80. 176-182.
38. PETZOLD, G. 2009. Ice morphology: fundamentals and technological applications in foods. *Food Biophysics*. Vol. 4. 378-396.
39. RAMOS, J. L., DELGADO, E., BAUTISTA, A. L., MORALES, C. 2004. Changes in volatiles with the application of progressive freeze-concentration to Andes berry.
40. RODRIGUEZ, R., VICTOR. M. 2008. *Bases de la alimentacion humana* editorial CEDRO, Madrid España, pp. 764.
41. SAKATA, T., DIETENBERG, M. 1995. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity. *Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 26, 607-619.



42. SCHMIDT, K. WON, T. 2009. Determination of meat quality by texture analysis. *Pattern Recognition Letters*. Vol. 19, 1319-1324.
43. SUN, C., ZHU, W. 1999. Neighboring grey level dependence matrix for texture classification. *Computer Vision, Graphics and Images Processing*. Vol. 23, 341-352.
44. TUDOR, V., REZKALLAH, K., 2003. An experimental investigation on frost control using DC and AC electric fields on horizontal, down Ward-facing plate. *HVAC&R*. Vol. 2, 203-213.
45. VARGAS, P. 2008. Fenomenos de Transporte. *Fundamentos de Transferencia de Masa*. Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda” Departamento de energetica.
46. WANG, N. BRENNAN, J.G. 2012. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *J. Food Eng.* Vol. 24, 61-76.
47. ZHENG, L., 2006. Recent applications of image texture for evaluation of food qualities –a review. *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 17, 113-128.
48. ZHONGLIANG, L., ZHANG, X., HONGYAN, W. MENG, S., CHENG, S. 2007, Influences of surfaces hydrophycility on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions. *ETF Science*. Vol. 31. 789-794.