



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Evaluación de la difusividad térmica
en un proceso de congelación
de *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris* de
cerdo**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO EN ALIMENTOS
P R E S E N T A:**

LUIS ALBERTO FONSECA SALGADO

**ASESORES: DRA. ADRIANA LLORENTE BOUSQUETS
M. EN C. JONATHAN CORIA HERNANDEZ**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

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

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

Evaluación de la difusividad térmica en un proceso de congelación de *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris* de cerdo.

Que presenta el pasante: Luis Alberto Fonseca Salgado

Con número de cuenta: 412068803 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 30 de Agosto de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. José Jaime Flores Minutti	
VOCAL	Dra. Adriana Llorente Bousquets	
SECRETARIO	I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez	
1er. SUPLENTE	I.A. María Guadalupe López Franco	
2do. SUPLENTE	Dr. Enrique Fuentes Prado	

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

“Mereces lo que sueñas”

-Gustavo Cerati-

“Mira las estrellas y no a tus pies. Intenta entender lo que ves y pregúntate que hace que el universo exista. Ten curiosidad”- Stephen Hawking-

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, ya que es el motor de mi alma y mi corazón (Personalmente se los hare saber). Gracias totales.

A la Dra. Adriana más que mi asesora, más que mi maestra. Una Guía, muchas gracias por escuchar todas mis inquietudes.

Al M. en C. Jonathan, gracias por sus observaciones y recomendaciones.

A mi alma mater, la UNAM

“En lo que piensas te conviertes. Lo que sientes lo atraes. Lo que imaginas, lo creas”

-Buda-

Dedicatoria

A mi familia

Al autor de este trabajo: No fue fácil el camino y sin embargo lograste pasar cada uno de los obstáculos, desafíos y demás; todo lo malo, la tristeza, el dolor ya déjalo atrás, aunque no lo creas este es un solo paso más en lo que te has de convertir, en lo que harás y en el ejemplo que serás. Recuerda que tu camino aquí no acaba, aún falta mucho por aprender, mucho por vivir, ten en cuenta estas palabras, cada que te sientas perdido o desesperado, no es el fin, y más aún, recuerda que debes tener mucha disciplina en todo lo que vas a hacer, recuerda mirar las nubes, las estrellas, sorpréndete por esas pequeñas cosas de la vida, no todo se trata de ti, disfruta el tiempo que tienes y aprovéchalo. Todo lo que has querido hacer hasta este día lo has hecho, sigue así, esfuéstrate más y lograras más. Ten fe en ti mismo, sabes que no has alcanzado todo tu potencial aun, demuéstrate todos los días, que puedes y vas a mejorar. Ánimo esto apenas comienza.

En honor al maestro Víctor†

“Las metas suelen ser a corto, mediano y largo plazo. Los sueños son para siempre”

-Antoine Salgado-

**Esta tesis forma parte de los proyectos del Taller
Multidisciplinario de Ingeniería en Alimentos
Procesos Tecnológicos de Productos Cárnicos
Laboratorio 7 de Bioconservación en la Unidad de Investigación
Multidisciplinaria de la Facultad de Estudios Superiores
Cuautitlán**

**Se agradece al Proyecto PIAPI 1635 “PROCESOS
TECNOLÓGICOS DE PRODUCTOS CÁRNICOS”
por el apoyo recibido para este proyecto de tesis**

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Introducción	2
Capítulo 1. Marco Teórico	4
1.1. Carne de Cerdo.....	5
1.1.2. Músculos Rojos Oxidativos y Blancos Glucolíticos	8
1.1.3. Calidad de la carne	9
1.2. Color.....	10
1.3. pH.....	10
1.4. Transferencia de Calor	10
1.4.1. Conductividad Térmica	11
1.4.2. Calor específico.....	11
1.4.3. Densidad.....	11
1.4.4. Difusividad térmica	12
1.4.5. Ley de Fourier para la conducción de calor	12
1.5. Método de Análisis Numérico.....	13
1.6. Congelación.....	16
1.6.1. Curva de congelación	17
1.6.2. Punto Inicial de Congelación (PIC).....	18
1.6.3. Congelación de Carne	19
Capítulo 2.	24
2. Descripción de la Secuencia Experimental	26
2.1. Materia Prima.....	26
Actividades Preliminares.....	26
2.2. Validación de Termopares	26
2.3. Centro Térmico	27
2.4. Densidad.....	28
2.5. Conductividad Térmica.....	29
2.6. Calor específico.....	30
2.7. Difusividad Térmica.....	31
Método 2 Análisis Numérico (Cambio de Variable):	31
Capítulo 3.....	34

3. Análisis Estadístico de resultados	37
3.1. Calor Específico de la pierna y el lomo sin congelar	37
3.2. Calor específico en Congelación de la pierna y el lomo	38
3.3. Conductividad térmica de la pierna y el lomo sin congelar	40
3.4. Conductividad Térmica en congelación de la pierna y el lomo	41
3.5. Difusividad Térmica.....	42
3.6. Músculo vs. músculo (pierna vs. lomo).....	43
Conclusiones	44
BIBLIOGRAFÍA.....	46
Anexos.....	50

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Composición de diferentes tipos de carne	6
Cuadro 2 Composición de los músculos utilizados.....	8
Cuadro 3 Resultados de los parámetros termofísicos de lomo y pierna de cerdo	35
Cuadro 4 Resultados de Difusividad Térmica de lomo y pierna de cerdo	36
Cuadro 5 Anova de 1 vía para Calor específico de la pierna y el lomo sin congelar	37
Cuadro 6 Anova de 1 vía para el calor específico en congelación de pierna y lomo de cerdo	38
Cuadro 7 Anova de 1 vía de la conductividad térmica de la pierna y lomo sin congelar	40
Cuadro 8 Anova de 1 vía de la conductividad térmica en la congelación de la pierna y el lomo	41
Cuadro 9 Anova de 2 vías Método matemático 1 vs. Método matemático 2.....	42
Cuadro 10 Anova 2 vías para comparación de la difusividad térmica en los músculos.....	43

Índice de Figuras

Figura 1 Localización de los músculos <i>Longissimus dorsi</i> y <i>Biceps femoris</i>	9
Figura 2 Esquema que ilustra la nomenclatura utilizada en el análisis numérico bidimensional de conducción de calor.....	14
Figura 3 Curva de Congelación para alimentos	17
Figura 4 Secuencia Experimental.....	25
Figura 5 Corte de placas de carne de cerdo.....	26
Figura 6 Registrador de temperaturas	27
Figura 7 Acomodo de Termopares.....	27
Figura 8 Centro térmico y curva de congelación para pierna.....	28
Figura 9 Conductímetro Decagon K2	29
Figura 10 Calorímetro de mezclas	30
Figura 11. Cálculo de la Difusividad Térmica	33
Figura 12 Calor Específico de la pierna y el lomo sin congelar.....	38
Figura 13 Calor Específico en congelación de pierna y lomo de cerdo	39
Figura 14 Conductividad Térmica de la pierna y el lomo sin congelar.....	40
Figura 15 Conductividad Térmica en congelación de la pierna y el lomo	41
Figura 16 Interacción entre los métodos matemáticos y resultados de la difusividad térmica	42
Figura 17 Interacción entre los músculos de cerdo en el cálculo de la difusividad	43

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidades
A	Área superficial del objeto	m ²
C _p	Calor específico	J/kg °C
CV	Coefficiente de variación	Adimensional
dt	Diferencial de tiempo	S
dT	Diferencial de Temperatura	°C
k	Conductividad Térmica	W/m °C
m	Masa	kg
l	Lomo	
p	pierna	
dQ	Velocidad de transferencia de calor a la cual una fuente de calor irradia energía	W/m ²
q	Velocidad de transferencia de calor	W
q _x	Velocidad de transferencia de calor en dirección x	W
q _y	Velocidad de transferencia de calor en dirección	W
r	Coefficiente de correlación de Pearson	Adimensional
R ²	Coefficiente de determinación	Adimensional
t	Tiempo	S
T	Temperatura final	°C, K
T _A	Temperatura en el punto A	°C, K
T _B	Temperatura en el punto B	°C, K
T _m	Temperatura por corrección del equipo	°C, K

T_0	Temperatura inicial	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
V	Volumen	m^3
v	Posición x	M
V_f	Volumen final	m^3
V_0	Volumen inicial	m^3
w	Posición y	M
x, y, z	Direcciones en el plano cartesiano	Adimensional
x	Distancia desde el centro del cuerpo, hacia a afuera	M
x_A	Distancia en el punto A	M
x_B	Distancia en el punto B	M
y_{n+1}	Temperatura en el punto n con incremento	$^{\circ}\text{C}$
α	Difusividad térmica	m^2/s
∂	Derivada parcial	Adimensional
Δ	Incremento en las direcciones correspondientes	Adimensional
ρ	Densidad	kg/m^3
σ	Corrección de temperatura	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
σ_0	Conductividad térmica inicial	Wm/K
σ_m	1.05 corrección del equipo	Wm/K
Ψ	Relación de incremento de temperaturas con el incremento de dirección	$^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$

Resumen

La carne roja de mayor consumo mundial es la carne de cerdo, cuya demanda en las últimas décadas ha experimentado un fuerte incremento. Ello se ha debido a los cambios en los patrones de consumo derivados del aumento de ingresos en los países en desarrollo con economías de rápido crecimiento. Junto con el de las aves de corral, el porcino es el subsector pecuario de mayor crecimiento, con un número de animales que alcanzará los mil millones antes de 2015, el doble que en la década de 1970 (FAO, 2012). La producción porcina está distribuida por todo el mundo, con exclusión de algunas regiones que mantienen ciertas reservas culturales y religiosas en relación con el consumo de carne de cerdo (FAO, 2012).

El Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) informó que al cierre del año 2013, las exportaciones de carne de cerdo superaron las 86 mil 294 toneladas, lo que implica un incremento de tres por ciento en relación con las 84 mil 090 toneladas que se colocaron en el mercado durante 2012 (SAGARPA, 2014).

Se trabajó con 2 músculos de cerdo *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris*, de cerdos engordados en el Bajío, machos castrados, de 6 meses de edad y peso aproximado de 100 kg, sacrificados 24 horas antes, en un rastro TIF. Para obtener las unidades experimentales, se hizo un corte paralelo al sentido de las fibras en los músculos, en forma de placa infinita de 4x6x1cm, se procedió a encontrar el centro térmico de las mismas y se aplicó la solución de la ecuación de Fourier para conducción de calor. Para encontrar el centro térmico se utilizarán termopares tipo k en un lector de temperaturas marca *General* previamente validados; una vez obtenido el centro térmico de las placas, se construyeron las curvas de congelación, las cuales facilitaron la resolución de la ecuación de Fourier, además de determinar el punto inicial de congelación, estas placas se colocaron en un congelador comercial, a una temperatura mínima de -18 °C. Posteriormente se realizaron las siguientes determinaciones. a) Conductividad térmica (*Sweat*, 1985), se determinó mediante un conductímetro marca DECAGON (KD-2). b) Calor Específico (*Resnik, Halliday & Krane*, 2002), en el cual se utilizó un calorímetro de mezclas para determinar el calor específico de las muestras de carne congeladas y a temperatura de refrigeración, c) Difusividad térmica, se obtuvo por 2 métodos matemáticos, por medio de un método numérico (diferencias finitas) y de la ecuación para la determinación de la difusividad térmica cuyo valor fue obtenido experimentalmente. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado. El análisis de resultados se realizó con el software Minitab 16, y se construyeron los gráficos correspondientes, con el fin de obtener datos más aproximados en la resolución de esta ecuación, así como poder comparar los cambios que estos pudiesen tener. Los cambios en las propiedades termofísicas de los dos músculos (no significativos) al momento de la evaluación, no afectaron el cálculo de la difusividad ya que los valores fueron muy similares y la cantidad de sólidos y agua no provocó dificultad en el flujo de calor para el cálculo de esta propiedad.

Introducción

La carne de cerdo es una de las carnes más consumidas en el mundo, además una de las más aprovechadas, porque se utiliza casi toda la canal del animal, en la elaboración de muchos sus subproductos: jamón, chorizo, panceta, morcilla, tocino, paté, etc. La porcicultura mexicana es una de las actividades más importantes del sector pecuario mexicano, por lo que los datos estadísticos la identifican como la tercera fuente de proteína animal para la alimentación humana ofertada en México (SAGARPA, 2011). Uno de los métodos que garantiza la mayor preservación de la calidad de la carne es la congelación (Kerry, 2002). La determinación del tiempo de congelación, que depende de las propiedades físicas y térmicas de la carne, es un parámetro importante para establecer la capacidad del sistema de congelación a emplear (Heldman, 1983).

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) indicó que la carne de cerdo fresca y procesada que se comercializa en el extranjero proviene de Establecimientos Tipo Inspección Federal (TIF) ubicados en diez estados de la República: Baja California, Chihuahua, Coahuila, Estado de México, Guanajuato, Jalisco, Nuevo León, Sinaloa, Sonora y Yucatán (SAGARPA, 2014).

En el caso específico de la carne, los trabajos publicados determinan el valor de sus propiedades termofísicas y modelan su comportamiento térmico y mecánico (Choi y Okos, 1986, Rahman, 1995), modelos matemáticos basados en métodos numéricos que se aproximan a la representación del fenómeno físico (Franke, 2000, Saad y Scott, 1996, Sanz, et al., 1999, Sun y Zhu, 1999), sin embargo, la información disponible es dispersa, fraccionada y tiene un alto grado de variación, lo que dificulta el uso de los valores publicados y de los modelos propuestos en aplicaciones industriales. Por esto se hace necesario una revisión sobre este tema que permita determinar las dificultades que se presentan e identificar las oportunidades de hacer nuevos aportes y disponer de modelos y valores experimentales confiables (Ochoa, Amézquita, Chejne, 2005).

Se buscará establecer el efecto de la composición de la carne al utilizar como materia prima dos tipos de músculos: oxidativo (*Biceps femoris*) y glucolítico (*Longissimus dorsi*), dado que por sus funciones, el primero tiene mayor concentración de Mioglobina (Mb) que el



segundo. Por el contrario el segundo contiene mayor cantidad de agua que el primero. Se utilizaron 2 métodos matemáticos para calcular la difusividad térmica durante el proceso de congelación de esta materia prima cárnica.

En el presente trabajo se buscó evaluar algunas propiedades termofísicas de la carne de cerdo, con el fin de obtener resultados precisos, y también comparar las características de 2 diferentes músculos de cerdo, con el fin de tener a la disposición más datos que ayuden a estudiar la transferencia de calor en la carne y sus derivados, con el fin de establecer una metodología general, para poder realizar diseño de equipos, procesos y normas que faciliten el estudio de estos fenómenos de transferencia de calor.



Capítulo 1. Marco Teórico

1.1. Carne de Cerdo

La NOM-194-SSA1-2004 define a la carne como la estructura muscular estriada esquelética, acompañada o no de tejido conectivo, hueso y grasa, además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos; proveniente de los animales para abasto, que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas; se incluyen las refrigeradas o congeladas.

La carne se puede clasificar de diferentes formas, ya sea por su especie, su proceso, o según la forma en la que ha sido conservada (temperatura). De esta última se especifican la carne caliente, refrigerada y congelada (SAGARPA, 2011).

La carne caliente (fresca) es aquella que pasa directamente de las salas de faenado (rastró) al consumidor, a través de diferentes puntos de venta. Esta carne proviene de un animal que estuvo solo unas horas antes (24 horas aproximadamente) del sacrificio. Esta carne se llama caliente por qué no fue sometida a ningún proceso de enfriamiento.

La carne refrigerada es aquella que ha sido sometida a un proceso de enfriamiento y que su masa muscular interna ha alcanzado una temperatura menor de los 5°C (1-4°C preferentemente). La carne tiene de 1 a 4 días de reposo después de faenado el animal. Este tiempo ha permitido el madurado de la carne y por lo tanto, tiene las mejores características de textura y sabor. Es la forma más recomendada de consumir la carne de cerdo.

La carne de cerdo congelada es aquella cuya temperatura interna es de -18°C y que, siempre y cuando se hayan seguido los procesos adecuados de congelamiento, es difícil distinguirla de la carne refrigerada. En general, debe de estar libre de malos olores y tener color característico a rosa. Una vez que se descongela, esta no deberá de congelarse nuevamente. El mejor descongelado es lento, preferentemente en refrigeración, para evitar que sea dura y seca (SAGARPA, 2011).

El cerdo se encuentra hoy entre los animales más eficientemente productores de carne; ya que todo el animal se utiliza tanto para la venta de carne por cortes y para subproductos, es el único animal del que no se desperdicia nada, sus características particulares, como la gran precocidad y prolificidad, corto ciclo reproductivo y gran capacidad transformadora de

nutrientes, lo hacen especialmente atractivo como fuente de alimentación. El valor nutritivo de la carne de cerdo la señala como uno de los alimentos más completos para satisfacer las necesidades del hombre, y su consumo podría contribuir en gran medida a mejorar la calidad de vida humana desde el punto de vista de los rendimientos físicos e intelectuales (SAGARPA, 2011).

El hecho de que la carne de cerdo siga siendo censurada por varios sectores consumidores como un producto peligroso, ha hecho que su producción y distribución sea todavía incipiente; y esta actividad no se haya desarrollado como una verdadera industria.

La carne fresca de cerdo ha mejorado su calidad en los últimos años; actualmente, ofrece 31% menos de grasa, 14% menos de calorías y 10% menos de colesterol con relación al cerdo producido hace 10 años (*Universo Porcino*, 2012).

El *Codex Alimentarius* define la carne como “todas las partes de un animal que han sido dictaminadas como inocuas y aptas para el consumo humano o se destinan para este fin”. La carne se compone de agua, proteínas, minerales y grasas, vitaminas y otros componentes bioactivos, así como pequeñas cantidades de carbohidratos.

Cuadro 1. Composición de diferentes tipos de carne

Producto	Agua	Prot.*	Grasas	Cenizas	kJ*
Carne de vacuno (magra)	75.0	22.3	1.8	1.2	485
Canal de vacuno	54.7	16.5	28.0	0.8	1351
Carne de cerdo (magra)	75.1	22.8	1.2	1.0	469
Canal de cerdo	41.1	11.2	47.0	0.6	1975
Carne de ternera (magra)	76.4	21.3	0.8	1.2	410
Carne de pollo	75.0	22.8	0.9	1.2	439
Carne de venado (ciervo)	75.7	21.4	1.3	1.2	431

** Tecnología de procesamiento de carne para pequeños y medianos productores

*Proteínas

* Kilojoules (Kj)

Fuente: *FAO*, 2007

Desde el punto de vista nutricional, la importancia de la carne deriva de sus proteínas de alta calidad, que contienen todos los aminoácidos esenciales, así como de sus minerales y

vitaminas de elevada biodisponibilidad. La carne es rica en vitamina B₁₂ y hierro, los cuales no están fácilmente disponibles en las dietas vegetarianas (FAO, 2007) (Cuadro 1).

Proteínas:

En el organismo humano las proteínas cumplen un papel importante para formarlo, mantenerlo y repararlo. La calidad de las proteínas de cualquier fuente alimenticia se mide por la cantidad y disponibilidad de los aminoácidos contenidos en ellas (FAO, 2007).

La **carne de cerdo** es una fuente de proteína esencial, porque tiene un alto contenido de aminoácidos esenciales, algunos de ellos no son sintetizados por el organismo humano.

Existen tres tipos de proteínas en la carne. Las proteínas contráctiles que son el tipo más valioso para el procesador cárnico. Las proteínas del tejido conectivo que son las más abundantes en la carne. El tercer tipo de proteínas cárnicas es el de las proteínas sarcoplásmicas (FAO, 2007).

Grasas: La grasa es el componente más variable de la carne en cuanto a composición. Las células grasas viven y funcionan como todas los demás tipos de células y están llenas de lípidos, los cuales varían grandemente en su composición de ácidos grasos. Las cadenas de ácidos grasos pueden variar en longitud de 12-20 carbonos, y pueden ser totalmente saturadas (ningún enlace doble), mono insaturadas (un enlace doble) o poliinsaturadas (dos o tres enlaces dobles). Mientras más insaturado sea un ácido graso, menor será su punto de fusión y más susceptible será la grasa a la oxidación y al desarrollo de sabores rancios y malos olores (FAO, 2007) (Cuadro 1).

Dentro de las funciones metabólicas de las grasas está la de servir de vehículo a las vitaminas liposolubles (A, D, E y K). Los lípidos en la **carne de cerdo**, presentes en el tejido muscular, en proporción no mayor de 3-5%, proporcionan características de jugosidad, ternura y buen sabor, además de ser indispensables en la fabricación de productos cárnicos porque aportan palatabilidad y textura.

Carbohidratos: Como en todas las carnes están presentes en muy bajo porcentaje, pues son compuestos sintetizados más fácilmente por productos de origen vegetal. El porcentaje

que posee la **carne de cerdo** es el 1% y está básicamente representado en glucolípidos (FAO, 2007).

Minerales: Están presentes en la **carne de cerdo** en 1%, siendo los más importantes el hierro, manganeso y fósforo, los cuales son de gran importancia para el organismo humano, pues intervienen en la formación de huesos y dientes.

Vitaminas: En pequeñas cantidades son necesarias para el crecimiento, desarrollo y reproducción humana. En la **carne de cerdo** sobresalen las vitaminas del Complejo B y, en especial, la B₁ que se encuentra en mayor cantidad que en otras carnes. También es rica en vitaminas B₆, B₁₂ y Riboflavina (FAO, 2007).

1.1.2. Músculos Rojos Oxidativos y Blancos Glucolíticos

Además de las transferencias del grupo fosforil, ya descritas en las 3 ecuaciones previas, el ATP del músculo también se genera a través de la glicólisis y fosforilación oxidativa. Los músculos que dependen de la fosforilación oxidativa como fuente de ATP requieren altos niveles de oxígeno. Para asegurar la disponibilidad de oxígeno, estos músculos almacenan oxígeno como oximioglobina (Cuadro 2).

Cuadro 2 Composición de los músculos utilizados

g de porción comestible	Pierna de Cerdo	Lomo de Cerdo
Porción comestible	75	100
Energía (kca)	171	111
Agua (g)	69	75
Proteína (g)	18	20
Grasa Total (g)	11	3.4
Hidratos de Carbono (g)	0	Tr
Cenizas(g)	1.2	1.3

Fuente: Verdú, 2003

Músculos oxidativos con mioglobina son de color rojo debido a su alta cantidad de mioglobina. Los músculos glucolíticos no son tan ricos en mioglobina y por ende adoptan una apariencia blanca. Estos músculos generalmente almacenan glucógeno en grandes cantidades y generan la mayoría de su ATP a través de reacciones glucolíticas. Una de las diferencias funcionales más grandes entre las células musculares rojas y blancas es que

las fibras blancas generan ATP a través de una corta vía entre sustratos (por ejemplo, glucosa) y la aparición de ATP, mientras que en el músculo rojo la vía entre el sustrato (por ejemplo, glucosa) y el ATP constituye de más pasos en la reacción (por ejemplo, glicólisis más ciclo tricarbóxico además del transporte de electrones) y corresponde a un proceso más largo. Consecuentemente, los músculos esqueléticos de acción rápida son compuestos predominantemente de fibras blancas glucolíticas mientras que los músculos de acción lenta, tales como los que mantienen el tono, generalmente son rojos y oxidativos (Figura 1) (*The medical biochemistry*, 2015).

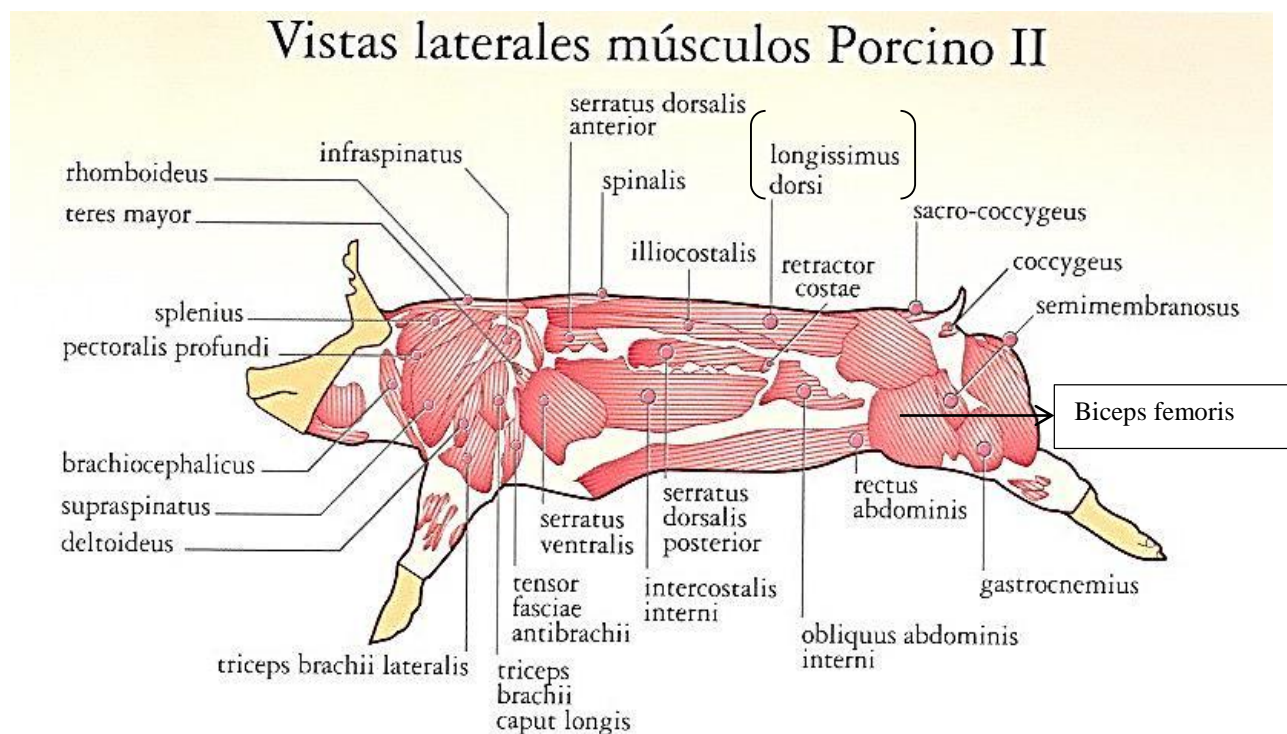


Figura 1 Localización de los músculos *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris*

Fuente: <http://www.recipesforlinux.com/2013/12/26/cerdo-despiece-cortes-partes/anatomia250/>

1.1.3. Calidad de la carne

La energía requerida para la actividad muscular en un animal vivo se obtiene del glucógeno presente en el músculo. En un animal sano y descansado, el nivel de glucógeno de sus músculos es alto. Una vez sacrificado el animal, este glucógeno se convierte en ácido

láctico y el músculo y la canal se vuelven rígidos (*rigor mortis*). Este ácido láctico es necesario para producir carne tierna, y de buen sabor, calidad y color. Pero si el animal está estresado antes y durante el sacrificio, se consume todo el glucógeno y se reduce el nivel de ácido láctico que se desarrolla en la carne luego de su sacrificio. Esto puede tener efectos adversos muy graves en la calidad de la carne como es el caso de carnes oscuras o muy pálidas (FAO, 2007).

1.2. Color

En la carne de cerdo se debe apreciar en los músculos externos del costillar, cuya evaluación definitiva se aplicará al hacer el corte transversal del lomo a la altura de la décima costilla y puede variar dentro de las siguientes tonalidades: pálido, ligeramente rosa grisáceo, rosa, rojo claro, y rojo oscuro (NMX-FF-081-2003).

1.3. pH

El músculo del cerdo vivo tiene un pH neutro de 7.0 a 7.2. De esta forma cuando el músculo se convierte en carne, el pH disminuye, se torna ácida. Tanto la disminución progresiva de pH y el valor de pH final son importantes en la determinación de la calidad de carne de cerdo. El pH es generalmente medido una hora después de su muerte (pH inicial) o dentro de 24 horas (pH Final). Si el pH inicial está debajo de 5.8, la carne puede presentar una condición de PSE debido a una disminución de pH muy rápida y a niveles muy bajos. Probablemente esta carne podrá llegar a valores de pH final por abajo de 5.5. Por otro lado, carne con un pH final arriba de 6.1 puede ser clasificada como DFD debido a que el pH no cayó a los niveles normales. Los rangos ideales para el pH inicial están entre 6.7 y 6.3; y para el pH Final entre 6.1 y 5.7 (FAO, 2001).

1.4. Transferencia de Calor

El proceso mediante el cual se transmite energía de un medio o material a otro de menor temperatura se conoce con el nombre de transferencia de calor. La transferencia de calor ocurre en los tratamientos térmicos a los que se someten los alimentos, con los objetivos de aumentar su estabilidad, cocinarlos o calentarlos para su consumo. Existen tres diferentes mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Estos mecanismos de transferencia se pueden observar en los tratamientos térmicos de alimentos. Los tratamientos térmicos tradicionales generalmente involucran mecanismos de

conducción y convección, mientras que han surgido nuevas tecnologías que utilizan la radiación principalmente como mecanismo de transferencia de calor (*Pérez – Reyes, 2013*).

La conducción ocurre cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, ya que se presenta una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura, por ejemplo cuando se coloca una pieza de carne sobre una plancha caliente para cocinar. La convección es la transferencia de calor entre partes relativamente frías y calientes de un fluido por mezclado, por ejemplo, cuando se hierve agua (*Pérez – Reyes, 2013*).

La transferencia de calor está relacionada con el intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos los cuales son llamados fuente y receptor. Existen tres maneras diferentes en que el calor pasa de la fuente al receptor.

Muchas de las aplicaciones en los tratamientos térmicos convencionales son combinaciones de ellas, conducción, convección y radiación (*Kern, 1999*).

1.4.1. Conductividad Térmica

La conductividad térmica relaciona la tasa de transferencia de calor de la conducción con el gradiente de la temperatura. La conductividad térmica de un alimento depende de factores tales como composición, estructura, y temperatura (*Umaña, 2008*).

1.4.2. Calor específico

El calor específico es una medida de la energía requerida para cambiar la temperatura de un alimento por un grado. Por lo tanto, el calor específico de alimentos o de bebidas se puede utilizar para calcular la carga de calor impuesta ante el equipo de refrigeración por refrigerar (enfriar) o congelar de alimentos y de bebidas. En alimentos no congelados, el calor específico llega a ser levemente más bajo mientras que la temperatura se eleva de 0°C a 20 °C. Para los alimentos congelados, hay una disminución grande del calor específico pues la temperatura disminuye (*Umaña, 2008*).

1.4.3. Densidad

Modelar la densidad de alimentos y de bebidas requiere el conocimiento de la porosidad del alimento, tan bien como la fracción y la densidad totales de los componentes del alimento.

La porosidad se requiere para modelar la densidad de los alimentos granulares almacenados en bulto, tal como granos y arroz. Para otros alimentos, la porosidad es cero (Umaña, 2008).

1.4.4. Difusividad térmica

Los valores experimentales determinados de la difusividad térmica de alimentos son escasos. Sin embargo con valores apropiados de la conductividad térmica, calor específico y densidad, la difusividad térmica se puede calcular usando la ecuación:

Dónde:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Ec. 1})$$

k es conductividad térmica (W/m °C)

ρ es densidad (kg/m³)

C_p es calor específico (J/kg°C)

La Difusividad Térmica (α con unidades m²/s) es una propiedad específica de cada material para caracterizar conducción de calor en condiciones no estacionarias. Este valor describe cuán rápido un material reacciona a un cambio de temperatura.

Para predecir procesos de enfriamiento o para simular cambios de temperatura, la difusividad térmica debe ser conocida; es un requisito para resolver la Ecuación Diferencial de Fourier para conducción de calor en condiciones no estacionarias (Netsch, 2014).

1.4.5. Ley de Fourier para la conducción de calor

Para que se pueda transferir calor, es necesario que exista una fuerza impulsora que contrarreste la resistencia, siendo la ecuación expresada como la “Ley de Fourier” para la conducción de calor en fluidos y sólidos:

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 2})$$

A la relación q_x/A se le conoce como flujo específico (flux) de calor y se expresa en W/m^2 . La cantidad dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección x . El signo negativo de la ecuación (2) se incluye debido a que, si el flujo de calor es positivo en determinado sentido, la temperatura disminuye en ese mismo sentido.

La ley de Fourier (EC.2) puede integrarse para el caso de transferencia de calor en estado estacionario a través de una pared plana con área de corte transversal constante A , donde la temperatura interior en el punto 1 es T_A y T_B es la temperatura del punto 2 a una distancia de $x_2 - x_1$ metros (Geankoplis, 1978).

Reordenando la ecuación 2 se tiene la ecuación 3.

$$\frac{q_x}{A} \int_{x_A}^{x_B} dx = -k \int_{T_A}^{T_B} dT \quad (\text{Ec. 3})$$

Se integra, suponiendo que k es constante y no varía con temperatura y se tiene la ecuación 4.

$$\frac{q_x}{A} = \frac{k}{x_B - x_A} (T_B - T_A) \quad (\text{Ec. 4})$$

1.5. Método de Análisis Numérico

En los últimos 100 años se han acumulado en la literatura un gran número de soluciones analíticas de problemas de transferencia de calor por conducción. Aun así, en muchas situaciones prácticas, la geometría o las condiciones de contorno son tales que no se ha obtenido una solución completa, o, si la solución se ha desarrollado, implica soluciones en series tan complicadas que su evaluación numérica es extremadamente difícil.

Para estas situaciones, la aproximación más fructífera al problema es la basada en técnicas de diferencias finitas (Figura 2) (Holman, 1983).

Considérese un cuerpo bidimensional que se divide en incrementos iguales en ambas direcciones x e y , como se muestra en la Figura 2. Los puntos nodales se designan como se

muestra, las posiciones m indicando el incremento en x y las posiciones n indicando el incremento en y.

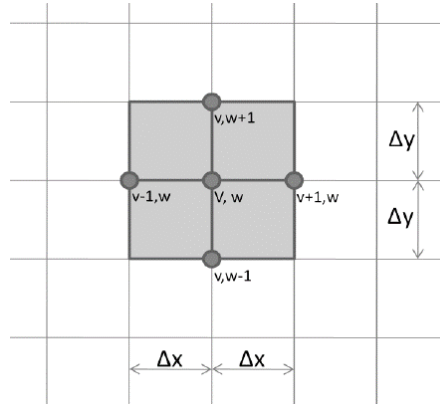


Figura 2 Esquema que ilustra la nomenclatura utilizada en el análisis numérico bidimensional de conducción de calor

Fuente: *Holman*, 1983

Dentro del cuerpo sólido, la ecuación diferencial que gobierna el flujo de calor se presenta en la ecuación 5 (*Holman*, 1983).

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Ec. 5})$$

Suponiendo propiedades constantes. Las segundas derivadas parciales pueden aproximarse por el método de diferencias finitas a:

Ecuaciones 6 y 7

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{1}{(\Delta x)^2} (T_{v+1,w} + T_{v-1,w} - 2T_{v,w}) \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{1}{(\Delta y)^2} (T_{v,w+1} + T_{v,w-1} - 2T_{v,w}) \quad (\text{Ec. 7})$$

La derivada del tiempo es aproximada por (8)

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{T_{v,w}^{p+1} - T_{v,w}^p}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 8})$$

En esta relación, los subíndices indican el incremento de tiempo. Al combinar las relaciones anteriores la ecuación en diferencias equivalente a la ecuación diferencial que gobierna el flujo de calor se indica en la ecuación 9.

$$\frac{(T_{v+1,w}+T_{v-1,w}-2T_{v,w})}{(\Delta x)^2} + \frac{(T_{v,w+1}+T_{v,w-1}-2T_{v,w})}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{v,w}^{p+1}-T_{v,w}^p}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 9})$$

Por lo tanto, si las temperaturas de los diferentes nodos son conocidas en cualquier tiempo particular, las temperaturas después de un incremento de tiempo Δt , pueden calcularse escribiendo una ecuación como la anterior para cada nodo (ecuación 10) obteniéndose así los valores de

$$T_{v,w}^{p+1} \quad (\text{Ec. 10})$$

El procedimiento puede repetirse para obtener la distribución después de cualquier número de incrementos de tiempo deseados (ecuación 11). Si los incrementos en las coordenadas del espacio se escogen de modo que

$$\Delta x = \Delta y \quad (\text{Ec. 11})$$

La ecuación resultante para $T_{v,w}^{p+1}$ dará la ecuación 12.

$$T_{v,w}^{p+1} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{v+1,w}^p + T_{v-1,w}^p + T_{v,w+1}^p + T_{v,w-1}^p) + \left[1 - \frac{4\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \right] T_{v,w}^p \quad (\text{Ec. 12})$$

Si los incrementos de tiempo y distancia se escogen convenientemente se utiliza la ecuación 13, de tal manera que

$$\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t} = 4 \quad (\text{Ec. 13})$$

La temperatura del nodo (v, w), después de un incremento de tiempo, es simplemente el promedio aritmético de las cuatro temperaturas nodales de los alrededores al comienzo del incremento de tiempo.

1.6. Congelación

El principio de la conservación de los alimentos por el sistema de congelación se basa en el mismo principio que el de la refrigeración, la ventaja que presenta es que en cuanto más baja es la temperatura más se aleja de las condiciones ideales en las que pueden multiplicarse los microorganismos, por lo que el alimento se altera cada vez menos.

La congelación consiste en la aplicación de temperaturas a los alimentos por debajo de 0 °C, de forma que parte del agua del alimento se convierte en hielo. Al mismo tiempo, como el agua se solidifica, se produce una desecación del alimento, lo que contribuirá de forma significativa a una mejor conservación. Lógicamente, este efecto será más importante cuanto más baja sea la temperatura (Umaña, 2008).

La temperatura de elección a nivel internacional es de -18°C/0°F, ya que por debajo de ésta se estima que no es posible la proliferación de bacterias (significativamente), por lo que disminuye la posibilidad de alteración y se reducen los riesgos para la salud. Hay que destacar que, después de la refrigeración, la congelación es el tratamiento que menos modificaciones produce en los alimentos. De forma que después de la descongelación los alimentos son casi idénticos a los productos crudos empleados como materia prima.

En el alimento existe una fracción del agua no congelable a la que corresponde una actividad de agua muy baja (de hasta 0.3). Esta agua, la cual se encuentra fuertemente unida a las estructuras moleculares, es denominada agua ligada y representa entre el 5 y el 10% de la masa total de agua contenida en el alimento.

El agua libre, por su parte, representa la mayor parte del agua contenida en los alimentos. Esta agua se encuentra en forma de geles tanto en el interior de la célula como en los espacios intercelulares, estando su retención influenciada por el pH y las fuerzas iónicas. Durante la congelación el agua es removida de su posición normal dentro de los tejidos y

convertida en hielo. Este proceso es parcialmente revertido durante la descongelación dando lugar a la formación de exudado (Umaña, 2008).

1.6.1. Curva de congelación

El proceso de congelación en los alimentos es más complejo que la congelación del agua pura. Los alimentos al contener otros solutos disueltos además de agua, presentan un comportamiento ante la congelación similar al de las soluciones. La evolución de la temperatura con el tiempo durante el proceso de congelación es denominada curva de congelación. La curva de congelación típica de una solución se muestra en la figura 3.

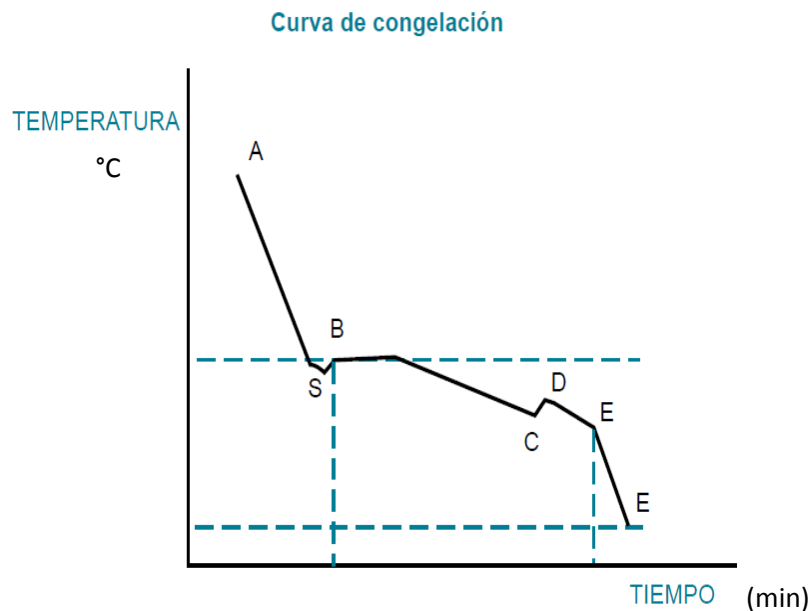


Figura 3 Curva de Congelación para alimentos

Fuente: Umaña, 2008

Esta curva posee las siguientes secciones:

AS: el alimento se enfría por debajo de su punto de congelación inferior a 0°C . En el punto S, al que corresponde una temperatura inferior al punto de congelación, el agua permanece en estado líquido.

SB: la temperatura aumenta rápidamente hasta alcanzar el punto de congelación (PIC), pues al formarse los cristales de hielo se libera el calor latente de congelación a una velocidad superior a la que este se extrae del alimento.

BC: el calor se elimina a la misma velocidad que en las fases anteriores, eliminándose el calor latente con la formación de hielo, permaneciendo la temperatura prácticamente constante. El incremento de la concentración de solutos en la fracción de agua no congelada provoca el descenso del punto de congelación, por lo que la temperatura disminuye ligeramente.

En esta fase es en la que se forma la mayor parte del hielo.

CD: El agua en el alimento comienza a cristalizar. La liberación del calor latente correspondiente provoca el aumento de la temperatura hasta la temperatura del soluto.

DE: la cristalización del agua continúa.

EF: la temperatura de la mezcla de agua y hielo desciende.

1.6.2. Punto Inicial de Congelación (PIC)

Los alimentos y las bebidas no congelan totalmente a una sola temperatura, sino algo sobre una gama de temperaturas. De hecho, los alimentos altos en contenido de azúcar o envasados en altas concentraciones de jarabe nunca se pueden congelar totalmente, no así se deben de almacenar a una temperatura uniforme típica para alimento congelado. Así, no hay un punto de congelación distinto para los alimentos y las bebidas, sino un punto de congelación inicial en el cual la cristalización comienza. El punto inicial de congelación de un alimento o de una bebida es importante no solamente para determinar las condiciones de almacenaje apropiadas del alimento, sino también para calcular características termofísicas. Durante el almacenaje de frutas y vegetales frescos, por ejemplo, la temperatura de la materia se debe guardar sobre su PIC para evitar de daños al congelar. En adición, porque hay cambios drásticos en las características termofísicas de alimentos es porque se congelan, el PIC de un alimento se debe saber para modelar sus características termofísicas (Umaña, 2008).

1.6.3. Congelación de Carne

La vida útil de la carne se incrementa considerablemente mediante el empleo de la congelación. La carne está compuesta de un grupo complejo de sustancias bioquímicas, incluyendo proteínas solubles y estructurales, grasas y electrolitos. La combinación de estas sustancias le imparte a la carne ciertas características que deben ser consideradas durante el almacenamiento congelado y la descongelación. Debido a ello, se debe monitorear el historial del producto antes de su congelación, para asegurar así obtener un producto deseable desde el punto de vista sensorial, y con estabilidad química y microbiológica (*Devine et al.*, 1996).

El factor biológico dominante que afecta la calidad de la carne es el glucógeno muscular (*Bendall*, 1973). Posterior a la matanza, el glucógeno muscular es convertido en ácido láctico, el cual causa la disminución gradual del pH muscular hasta el valor final alcanzado en el *rigor mortis*, determinado “pH final”. El valor de este “pH final” para un animal que fue bien alimentado y sacrificado es aproximadamente 5.5 a 6. Si el animal presentó elevado estrés previo a su sacrificio, el pH final es mayor a 6.0, lo cual ocasiona que la carne sea oscura, firme y seca (*Dutson*, 1981; *Young*, 1993).

El proceso de glucólisis puede ser acelerado a través del uso de estimulación eléctrica (*Chrystall y Devine*, 1986). El efecto inmediato de la estimulación, es la liberación de ácido láctico y disminución del pH del músculo debido a una contracción muscular intensa. Posteriormente, el pH continúa disminuyendo, ocasionando un inicio prematuro del *rigor mortis*.

En cuanto a la congelación, es simplemente la cristalización del hielo en el tejido muscular, e incluye los subsecuentes procesos de nucleación y crecimiento de cristales. Estos procesos son claves para los efectos en las velocidades de crecimiento y la calidad de la carne. Un concepto importante es el “tiempo de congelación característico”, el cual es una medida de la velocidad de congelación local, y se define como el tiempo durante el cual la temperatura disminuye desde -1 °C (inicio de la congelación) hasta -7°C (cuando 80% del agua es congelada). El crecimiento de cristales de hielo extracelulares ocurre a expensas del agua intracelular. Esto conduce a una deshidratación parcial de las fibras musculares y a



una distorsión subsecuente. A tiempos elevados (congelación lenta), los cristales de hielo son mayores, y la distorsión del tejido es mayor.

Justificación

Diferentes estudios se han realizado con el objeto de conocer las propiedades termofísicas de los alimentos, en estos se han obtenido valores para cada una de las propiedades y se han desarrollado modelos matemáticos para predecir su comportamiento a partir de la relación con la temperatura y características del material como:

Las propiedades termofísicas de la carne han sido estudiadas por diferentes investigadores, sin embargo, la información disponible es dispersa, fraccionada y tiene un alto grado de variación, lo que dificulta el uso de los valores publicados y de los modelos propuestos en aplicaciones industriales. Por esto se hace necesario una revisión este tema que permita determinar las dificultades que se presentan en identificar las oportunidades de hacer nuevos aportes y disponer de modelos y valores experimentales confiables (*Ochoa, 2005*).

Una de estas propiedades es la difusividad térmica, definida como una medida de la rapidez del cambio de temperatura cuando hay calentamiento o enfriamiento. La difusividad térmica es una propiedad importante que nos sirve de mucho en la realidad para poder crear, optimizar, adecuar o mejorar un proceso de producción dependiendo de las características específicas del alimento; también se pueden diseñar máquinas especializadas basándose en esta propiedad (*Universidad Nacional Agraria la Molina, 2010*).

La congelación es una técnica ampliamente usada para conservar alimentos. Los fabricantes y usuarios de equipos de congelación y descongelación de alimentos, necesitan sencillos métodos de predicción para calcular los tiempos en que se realizan ambos procesos. Durante la congelación de alimentos, se produce la formación de hielo en un amplio rango de temperaturas, a partir de la temperatura de comienzo de cambio de fase (T_f en °C). El cambio de fase del agua conlleva una variación importante de las propiedades físicas que caracterizan el fenómeno de transferencia de calor (densidad “ ρ ” en kg/m^3 , calor específico a presión constante “ C_p ” en $\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ y conductividad térmica, “ k ” en $\text{W}/(\text{m } * ^\circ\text{C})$). Esto hace que no exista una solución analítica general y exacta que prediga los tiempos de proceso contemplando las condiciones habituales de congelación (*Juidias, 2009*).

El poder conocer estas propiedades en los alimentos, ayuda en gran medida a optimizar procesos, y mejorarlos, aun así el estudio de estos es escaso, por ello es importante obtener estos datos y poder así llevar a cabo este tipo de proyectos.

Y es más aún de importancia en la carne y productos cárnicos ya que estos deben de pasar por una cadena de frío para poder llevar a cabo la maduración y por supuesto, que este método de conservación a bajas temperaturas nos lleve a que el periodo de conservación se mas alto y que tenga la calidad para el consumidor y para el proceso al cual se vaya a someter.

Es por eso que en el siguiente trabajo se presenta una metodología para determinar esta propiedad de suma importancia en el estudio de la transferencia de calor de los alimentos, haciendo la comparativa entre la ecuación normal de la difusividad y un método numérico con el objetivo de obtener datos más puntuales durante el proceso.

Objetivo General. Evaluar la difusividad térmica de *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris* de cerdo en forma de placas, durante su congelación, para conocer las posibles diferencias debidas a sus características inherentes, al utilizar 2 métodos matemáticos.

Hipótesis. La difusividad térmica evaluada durante el proceso de congelación se verá afectada directamente por la composición de los músculos oxidativos (*Biceps femoris*) y glucolíticos (*Longissimus dorsi*) de cerdo ya que varían en el contenido y tipo de proteínas y agua. Se espera que, el músculo *Longissimus dorsi* presente mayor difusividad térmica, por lo tanto facilitará la conducción de calor y al utilizar métodos matemáticos se tendrán valores más aproximados de difusividad térmica en el proceso de congelación.

Objetivo Particular 1. Determinar las propiedades termofísicas (C_p , kt) de *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris* de cerdo en forma de placas, durante su congelación, mediante técnicas y cálculos termodinámicos para la obtención de la difusividad térmica.

Objetivo Particular 2. Contrastar los dos métodos matemáticos en la obtención de datos de la difusividad térmica, y así establecer valores más aproximados durante el proceso de congelación de *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris* de cerdo en forma de placas.



Capítulo 2.

Metodología Experimental

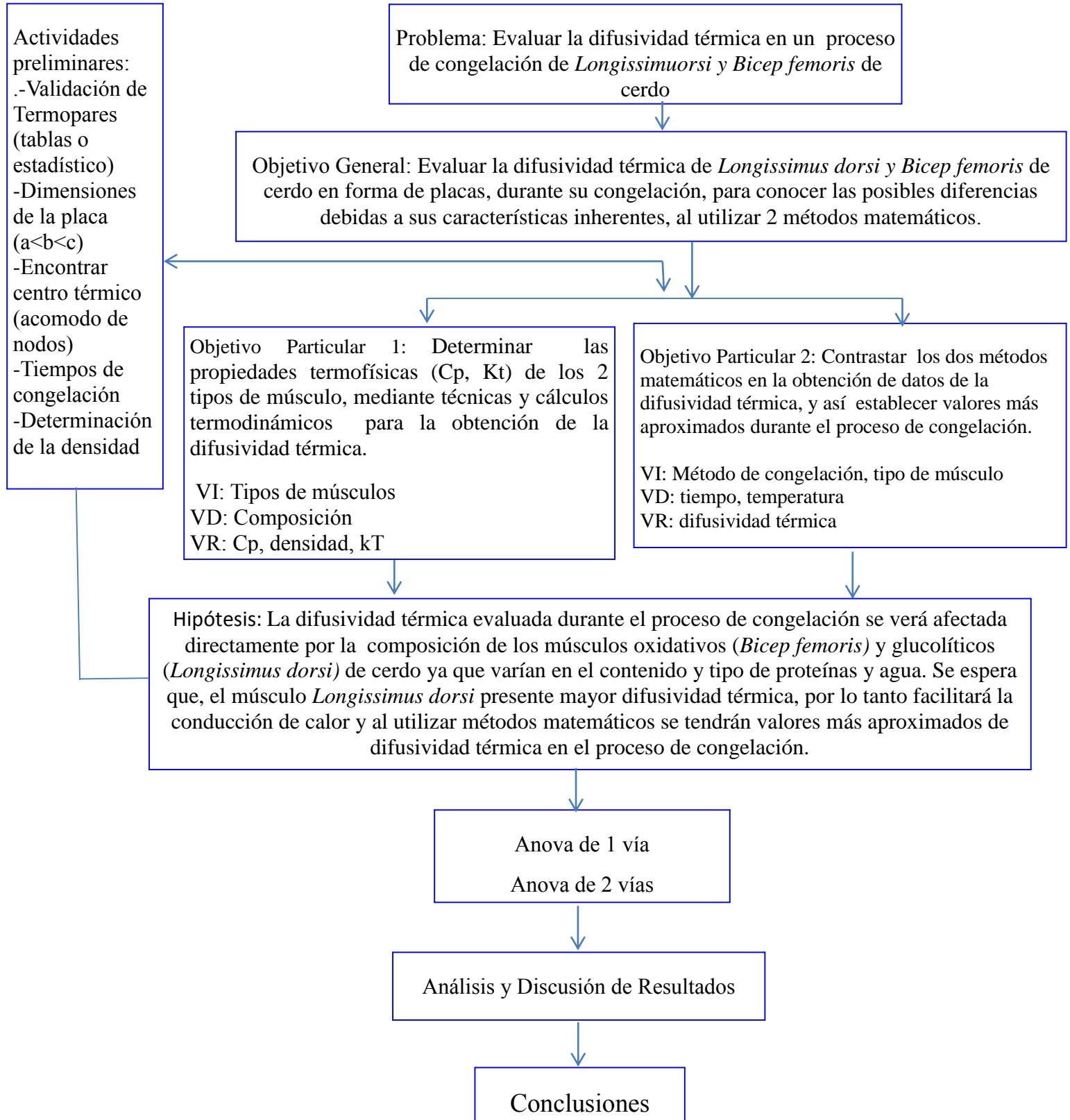


Figura 4 Secuencia Experimental

2. Descripción de la Secuencia Experimental

En la figura 4 se presenta la secuencia experimental utilizada en el presente trabajo, en el cual se cubrieron todos los objetivos marcados desde el inicio, a continuación se presenta la descripción de cómo se llevó a cabo la experimentación para llegar a los resultados esperados, así como una explicación de cada uno de los procesos.

2.1. Materia Prima

Se trabajó con 2 músculos de cerdo *Longissimus dorsi* y *Bíceps femoris*, estos provenían de cerdos traídos desde el bajo, sacrificados con 24 h de antelación en un rastro TIF, machos castrados de 6 meses de edad y peso aproximado de 90 kg, se hizo un corte en forma de placa infinita para poder realizar la solución de la ecuación de Fourier, en sentido a las fibrillas de los músculos (Figura 5).

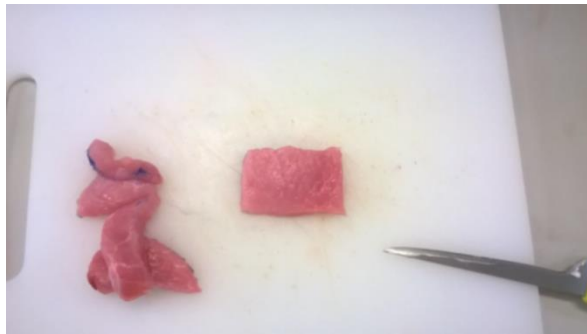


Figura 5 Corte de placas de carne de cerdo

Actividades Preliminares

2.2. Validación de Termopares

Se toma como referencia la temperatura de ebullición del agua en Cuautitlán Izcalli (92.8°C). A partir de que se alcanza la temperatura de ebullición cada minuto se toma la lectura del termopar hasta alcanzar 15 lecturas.

De los resultados obtenidos para cada termopar, se escoge como patrón aquel que tiene menor coeficiente de variación y en base a este se ajustan los otro cuatro termopares de acuerdo a la ecuación de la línea recta: $y=mx+b$

Se realizó con termopares tipo k en un lector de temperaturas marca *General* (Figura 6)



Figura 6 Registrador de temperaturas

Se hicieron las pruebas correspondientes de linealidad precisión y exactitud así como también se determinaron las ecuaciones de corrección y se elaboró una tabla de atributos a partir de estas pruebas (véase Anexo)

2.3. Centro Térmico

El centro térmico está en torno al centro geométrico siendo el último punto del cuerpo en alcanzar la temperatura deseada; ya sea en el calentamiento o enfriamiento del cuerpo en estudio.

Se acomodaron los termopares de la siguiente manera y se elaboró una curva para determinar que el centro térmico efectivamente se encontró en el centro geométrico del alimento (Figuras 8 y 9).

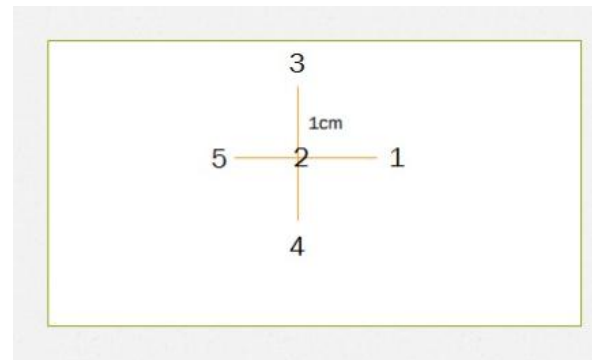


Figura 7 Acomodo de Termopares

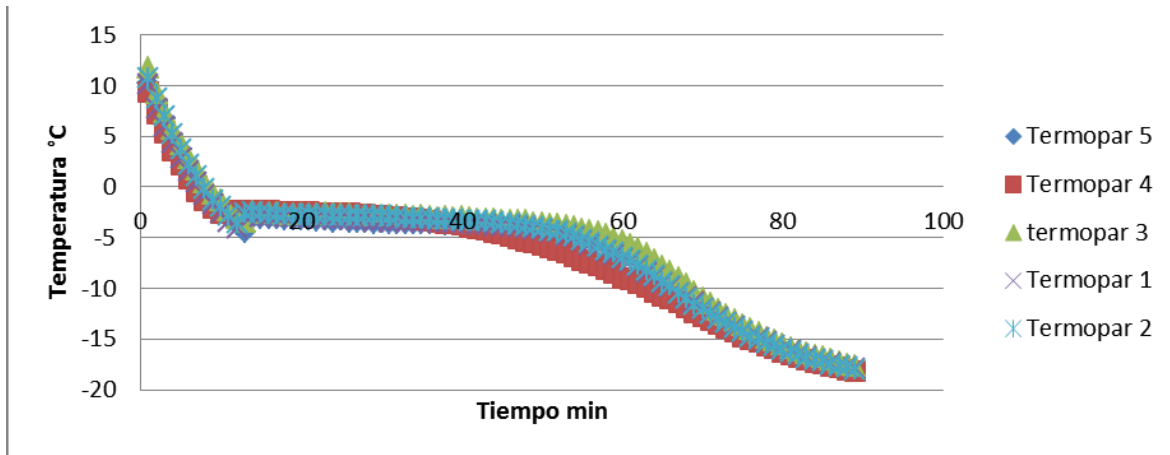


Figura 8 Centro térmico y curva de congelación para pierna

2.4. Densidad

El sólido se sumerge con cuidado y completamente en una probeta que contiene un volumen exacto de aceite (V_o). Luego se lee cuidadosamente el volumen final (V_f). El volumen del sólido corresponde a la diferencia

$$V = V_f - V_o \quad (\text{Ec.14})$$

El resultado nos da una densidad relativa así que para encontrar los valores absolutos se buscó en la bibliografía la densidad del aceite para poder sustituir en ecuación 15.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 15})$$

ρ = Densidad (g/mL)

m = Masa de la Muestra (g)

V = Volumen (mL)

2.5. Conductividad Térmica

Se utilizó un Conductímetro de marca DECAGON (KD-2) (Figura 9) que es un medidor compacto y portátil utilizado para medir las propiedades térmicas. Consiste en un sensor de una sola aguja que puede ser insertado en el medio que desea medir.



Figura 9 Conductímetro Decagon K2

Se utilizó una ecuación de corrección para el equipo, y así obtener los datos a las temperaturas deseadas, antes y después de la congelación.

$$\sigma = \frac{T_o * T_m}{T_m - T_o} (\sigma_o - \sigma_m) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right) + \sigma_m \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\sigma_m = 1.05 \frac{Wm}{k} \quad \text{Corrección de la conductividad térmica equipo}$$

σ_o = Conductividad térmica inicial

$T_m = 1473 \text{ K}$ Corrección de temperatura del equipo

2.6. Calor específico

Calorimetría: se utilizó un calorímetro de mezclas para determinar el calor específico de las muestras de carne congeladas y a temperatura de refrigeración.

La cantidad de energía que absorbe o cede un cuerpo que se pone en contacto con otro a diferente temperatura es proporcional a la masa de aquél, m , y a la variación de la temperatura que experimenta, ΔT

$$Q = C_p m \Delta T \quad (\text{Ec. 17})$$

Siendo C_p una constante de proporcionalidad, denominada calor específico, que depende de la naturaleza de dicho cuerpo. Con la siguiente ecuación se determinó el calor específico con un calorímetro de mezclas (Figura 10) y el procedimiento establecido para su uso.

$$\Delta Q = Q_1 + Q_2 = 0 \rightarrow 0 = m_1 c_{p1} \Delta T_1 + m_2 c_{p2} \Delta T_2 \quad (\text{Ec. 18})$$



Figura 10 Calorímetro de mezclas

Calorímetro de Mezclas:

Recipiente cerrado y térmicamente aislado del exterior, para evitar intercambios de calor con el medio ambiente. Contenía agua cuya masa se midió previamente; un termómetro sumergido en ella midió su temperatura. Se midió una cierta masa de la sustancia cuyo calor específico se buscaba y se le calentó a una temperatura determinada, se estableció su balance calorimétrico (calor cedido igual a calor absorbido) al observar el termómetro que señaló el aumento de temperatura.

2.7. Difusividad Térmica

Con los datos obtenidos durante la experimentación, se procedió a calcular la difusividad con los 2 métodos matemáticos propuestos:

Método 1 Ecuación para determinar la difusividad térmica:

$$\text{Dónde: } \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Ec. 1})$$

k es conductividad térmica (W/m °C)

ρ es densidad (kg/m³)

C_p es calor específico (J/kg°C)

Las unidades de la difusividad térmica se obtienen de la siguiente manera

$$\frac{\frac{W}{mC}}{\frac{kg}{m^3} \frac{J}{kgC}} = \frac{\frac{W}{m}}{\frac{J}{m^3}} = \frac{\frac{J}{sm}}{\frac{J}{m^3}} = \frac{m^3}{sm} = \frac{m^2}{s}$$

Siendo $W = \frac{J}{s}$

Método 2 Análisis Numérico (Cambio de Variable):

Para realizar el cálculo de la difusividad térmica se utiliza la ecuación de energía, en coordenadas rectangulares para 2 direcciones

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -k \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right] \quad (\text{Ec. 19})$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Ec. 20})$$

Sustituyendo 19 en 20

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (\text{Ec. 21})$$

Se cambian las derivadas parciales (∂) por incrementos. Y sustituyendo la difusividad en la ecuación, quedaría de la siguiente manera:



$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \alpha \left[\frac{\Delta T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta T}{\Delta y^2} \right] \quad (\text{Ec. 22})$$

Reacomodando la ecuación 22:

$$\frac{\Delta T}{\left[\frac{\Delta T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta T}{\Delta y^2} \right]} = \alpha \Delta t \quad (\text{Ec. 23})$$

Haciendo un cambio de Variable:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta T}{\Delta y^2} = \Psi \quad (\text{Ec. 24})$$

Y Reacomodando:

$$\frac{\Delta T}{[\Psi]} = \alpha \Delta T \quad (\text{Ec. 25})$$

Ajustando a la ecuacion de la recta:

$$y = mx \quad (\text{Ec. 26})$$

$$\frac{\Delta T}{[\Psi]} = \alpha \Delta T \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta T}{\Delta y^2} = \Psi \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\frac{\Delta T}{\left[\frac{\Delta T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta T}{\Delta y^2} \right]} = \alpha \Delta t \quad (\text{Ec. 23})$$

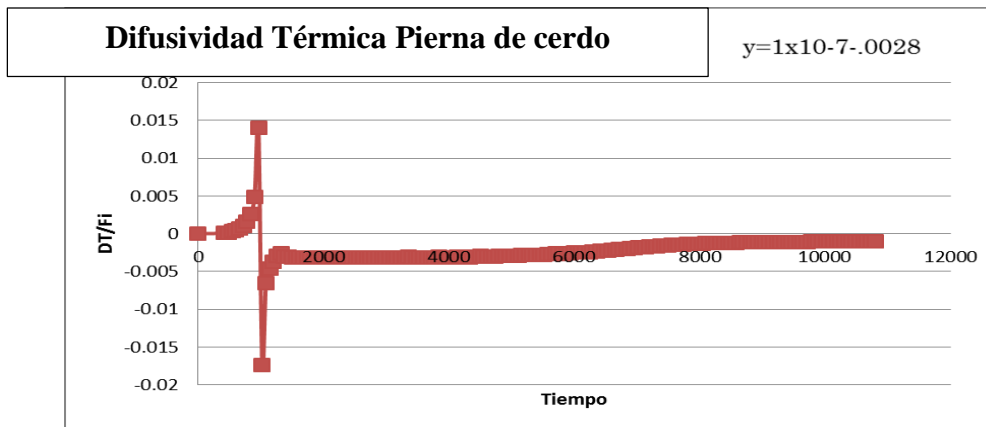
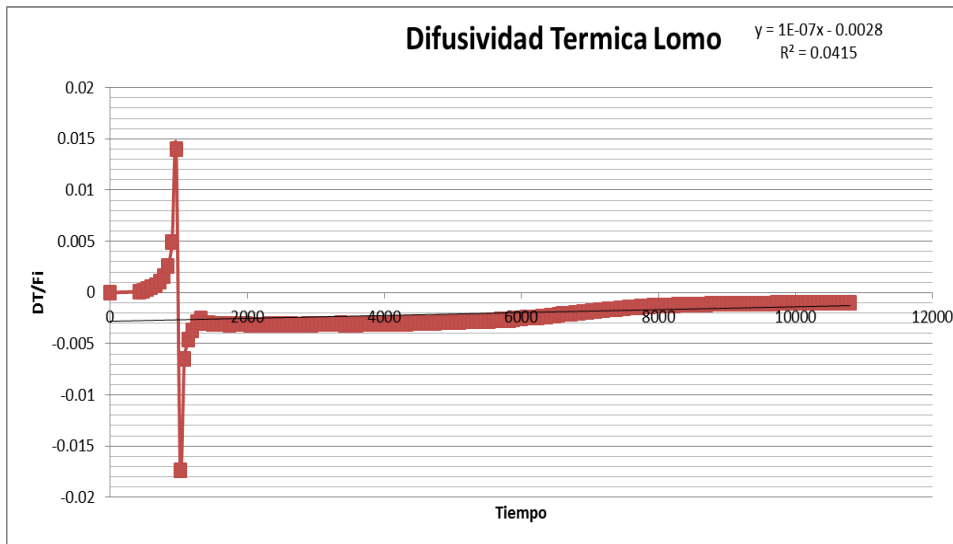


Figura 11. Cálculo de la Difusividad Térmica



Capítulo 3.

Resultados y Discusión

En el Cuadro 3 se presentan los resultados obtenidos de las actividades preliminares y los resultados experimentales de las propiedades termofísicas evaluadas, para la obtención de la difusividad térmica en los músculos de cerdo.

Cuadro 3 Resultados de los parámetros termofísicos de lomo y pierna de cerdo

	Lomo	Pierna
Densidad/sin congelar kg/m^3	841	818
Densidad/ congelado kg/m^3	810	785
Cp/ sin congelar $\text{J/kg}^\circ\text{C}$	8741.61	8910
Cp/ congelado $\text{J/kg}^\circ\text{C}$	8567.03	4811
kt/ sin congelar $\text{W/m }^\circ\text{C}$	0.38	0.44
kt/ congelado $\text{W/m }^\circ\text{C}$	1.34	1.03
Temperatura inicial de Congelación $^\circ\text{C}$	-2.57	-2.5
Tiempo inicial de Congelación (min)	27	33

En el Cuadro 4 se presentan los datos obtenidos de la difusividad térmica de los 2 músculos de cerdo, los resultados se presentan tanto de la ecuación para la difusividad térmica y del análisis numérico realizado en este trabajo, todos estos acorde a los datos experimentales obtenidos.

Cuadro 4 Resultados de Difusividad Térmica de lomo y pierna de cerdo

	Lomo	Pierna
Difusividad congelación cambio variable m²/s	1.33x10⁻⁷	1.7x10⁻⁷
Difusividad congelación ec. normal m²/s	1.94x10⁻⁷	1.88x10⁻⁷

En los datos recopilados por Ochoa, Amézquita y Chejne (2005), tienen valores de difusividad térmica de entre 0.05 - 0.5 m²/s para la carne de cerdo, lo cual experimentalmente y siguiendo esta metodología, son completamente distintos, de ahí la importancia de realizar la metodología experimental y más aún la de realizar el análisis numérico, ya que proporciona la historia térmica del proceso, y no solo el de congelación, sino que también se pueden determinar temperaturas a cada tiempo durante el proceso, ya sea de refrigeración o de congelación, algo que la ecuación normal para el cálculo de la difusividad no se puede determinar tan fácilmente.

3. Análisis Estadístico de resultados

3.1. Calor Específico de la pierna y el lomo sin congelar

En el Cuadro 5 se presentan los resultados del análisis estadístico de los valores de calor específico de pierna y lomo sin congelar.

Cuadro 5 Anova de 1 vía para Calor específico de la pierna y el lomo sin congelar

	GL	SC	F	P
calor específico	1	42563	0.02	0.899
error	4	9309514		
total	5	9352076		

Grupos Minitab 16:

Cp Pierna sin congelar 8910 J/kg°C A

Cp Lomo sin congelar 8742 J/kg°C A

Como se puede observar en los resultados de la experimentación en los Cuadros 3 y 4 y del estadístico usando el programa Minitab 16 del Cuadro 5, el cual agrupa los resultados dependiendo si hay diferencia estadística, en este caso los agrupa en el mismo grupo, lo cual indica que no hay diferencia estadística en el caso del calor específico del lomo y la pierna de cerdo sin congelar; si bien, los resultados obtenidos muestran una diferencia numérica amplia, estadísticamente el calor específico de los 2 músculos *Longissimus dorsi* y *Biceps femoris*, no tiene diferencia significativa ($P > 0.05$) (Figura 12), al no estar sometidos a ningún proceso o a bajas temperaturas, se puede deducir que el calor específico es igual en condiciones normales, los datos reportados por Ochoa, Amézquita y Chejne (2005), para condiciones normales nos presenta rangos de 3,500 J/kg·°C, sin embargo en el estudio no nos indica que músculos se utilizaron.

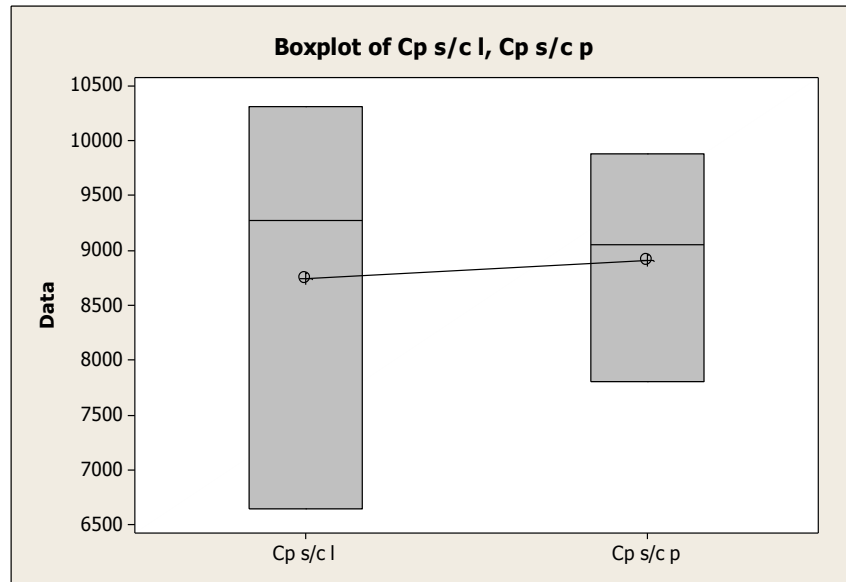


Figura 12 Calor Específico de la pierna y el lomo sin congelar

3.2. Calor específico en Congelación de la pierna y el lomo

En el Cuadro 6 se presentan los resultados del análisis estadístico de los valores de calor específico de pierna y lomo en congelación.

Cuadro 6 Anova de 1 vía para el calor específico en congelación de pierna y lomo de cerdo

	GL	SC	F	P
calor específico	1	21162632	33.52	.004
Error	4	2525210		
Total	5	23687842		

Grupos Minitab 16:

Cp c Lomo 8567.3 J/kg°C A

Cp c Pierna 4811.2 J/kg°C B

Cuando se somete a un proceso de congelación, el calor específico está relacionado con la temperatura, por lo tanto el calor específico se verá afectado, en este caso los resultados descendieron considerablemente, sin embargo el calor específico que más descendió fue el de la pierna, los resultados de C_p de ambos tienen una diferencia altamente significativa ($P < 0.01$), en este caso como se pueden observar en los grupos que genera el programa Minitab 16 con respecto al análisis estadístico y a los resultados tenemos una agrupación diferente.

El calor específico de la pierna descendió en casi la mitad de su valor respecto de los valores de refrigeración, este cambio en la propiedad pudo verse afectado por la composición de la pierna ya que tiene un menor contenido de humedad respecto al lomo.

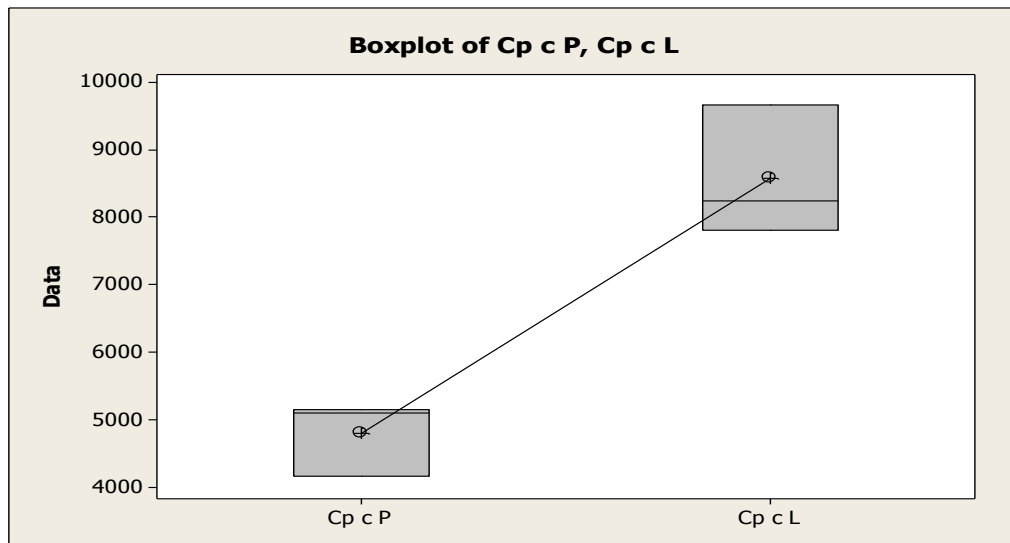


Figura 13 Calor Específico en congelación de pierna y lomo de cerdo

3.3. Conductividad térmica de la pierna y el lomo sin congelar

En el Cuadro 7 se presentan los resultados de conductividad térmica de pierna y lomo sin congelar.

Cuadro 7 Anova de 1 vía de la conductividad térmica de la pierna y lomo sin congelar

	GL	SC	F	P
Conductividad Térmica	1	0.00486	3.93	0.118
Error	4	0.00494		
Total	5	0.00980		

Grupos Minitab 16:

kt s/c Pierna 0.43807 W/m °C A

kt s/c Lomo 0.38117 W/m °C A

Aunque estadísticamente la conductividad térmica de los 2 músculos es igual, se puede observar en la Figura 14 y en la agrupación de estos valores de acuerdo al programa Minitab 16, que la conductividad de la pierna sin congelar es mayor a la del lomo, ya que al tener mayor contenido de grasa conduce el calor más rápido.

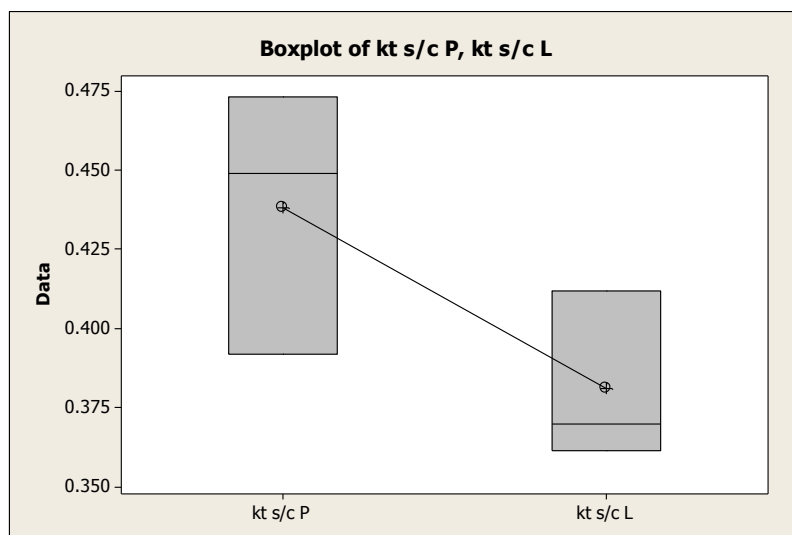


Figura 14 Conductividad Térmica de la pierna y el lomo sin congelar

3.4. Conductividad Térmica en congelación de la pierna y el lomo

En el Cuadro 8 se presentan los resultados del análisis estadístico de conductividad térmica de pierna y lomo en congelación.

Cuadro 8 Anova de 1 vía de la conductividad térmica en la congelación de la pierna y el lomo

	GL	SC	F	P
Conductividad Térmica	1	0.14304	87.90	0.001
Error	4	0.00651		
Total	5	0.14955		

Grupos Minitab 16:

kt c L 1.34337 W/m °C A

kt c P 1.03457 W/m °C B

En el proceso de congelación, el lomo es el que cuenta con una conductividad térmica más alta ya que su contenido de agua es mayor tiene menor oposición a la creación de cristales al tener menor cantidad de sólidos con respecto a la pierna. Los resultados del análisis estadístico evidencian diferencia altamente significativa ($P < 0.01$) para esta propiedad termofísica (Figura 15).

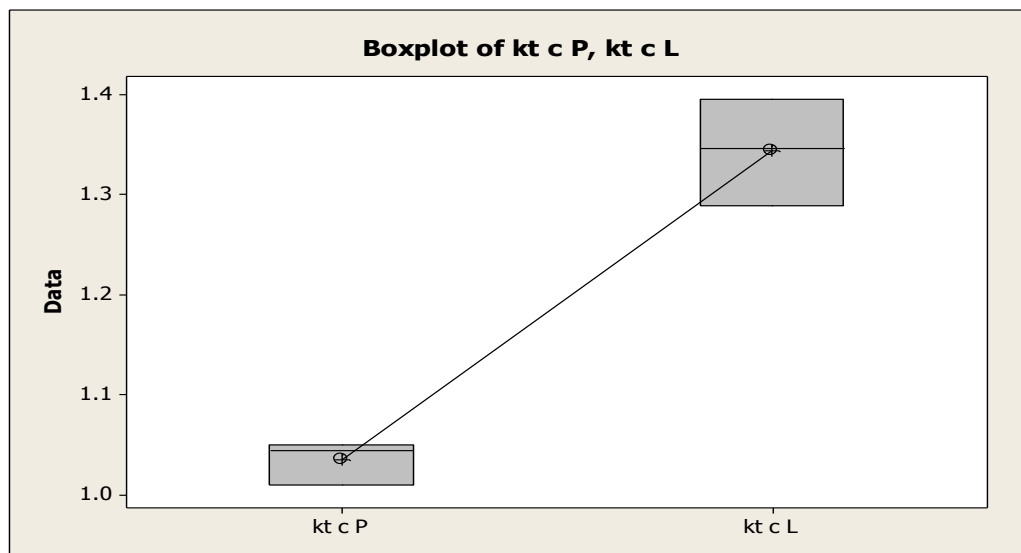


Figura 15 Conductividad Térmica en congelación de la pierna y el lomo

3.5. Difusividad Térmica

En el Cuadro 9 se presentan los resultados del análisis estadístico al evaluar el Método matemático 1 (ec. para difusividad) vs el Método 2 (cambio de variable), en el cual se establece que no existe diferencia estadística significativa ($P > 0.05$) entre ambos. Como se puede apreciar en la Figura 16 y en los datos obtenidos en el estadístico, la difusividad térmica evaluada con cualquiera de los 2 si bien tiene algunas diferencias, estas no son significativas estadísticamente.

Cuadro 9 Anova de 2 vías Método matemático 1 vs. Método matemático 2

	GL	SC	F	P
Músculo	1	0.0000	0.06	0.819
Método Matemático	1	0.0000	0.38	0.522
Interacción	1	0.0000	0.11	0.747
Error	8	0.0000		
Total	11			

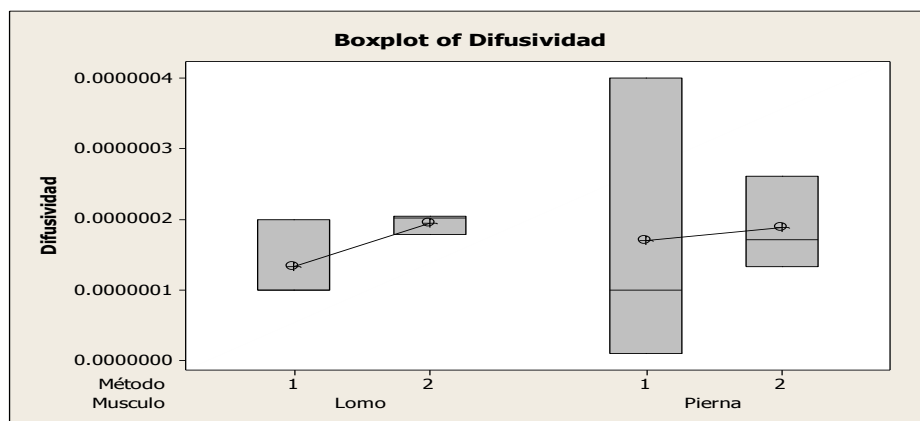


Figura 16 Interacción entre los métodos matemáticos y resultados de la difusividad térmica

3.6. Músculo vs. músculo (pierna vs. lomo)

En el Cuadro 10 se presentan los resultados del análisis estadístico al comparar la difusividad térmica en los músculos de pierna y lomo. Estadísticamente se pudo determinar que tanto la pierna como el lomo tienen la misma difusividad térmica (Figura 17).

Cuadro 10 Anova 2 vías para comparación de la difusividad térmica en los músculos

	GL	SC	F	P
Método Matemático	1	0.0000	0.38	0.552
Músculo	1	0.0000	0.06	0.819
Interacción	1	0.0000	0.11	0.747
Error	8	0.0000		
Total	11			

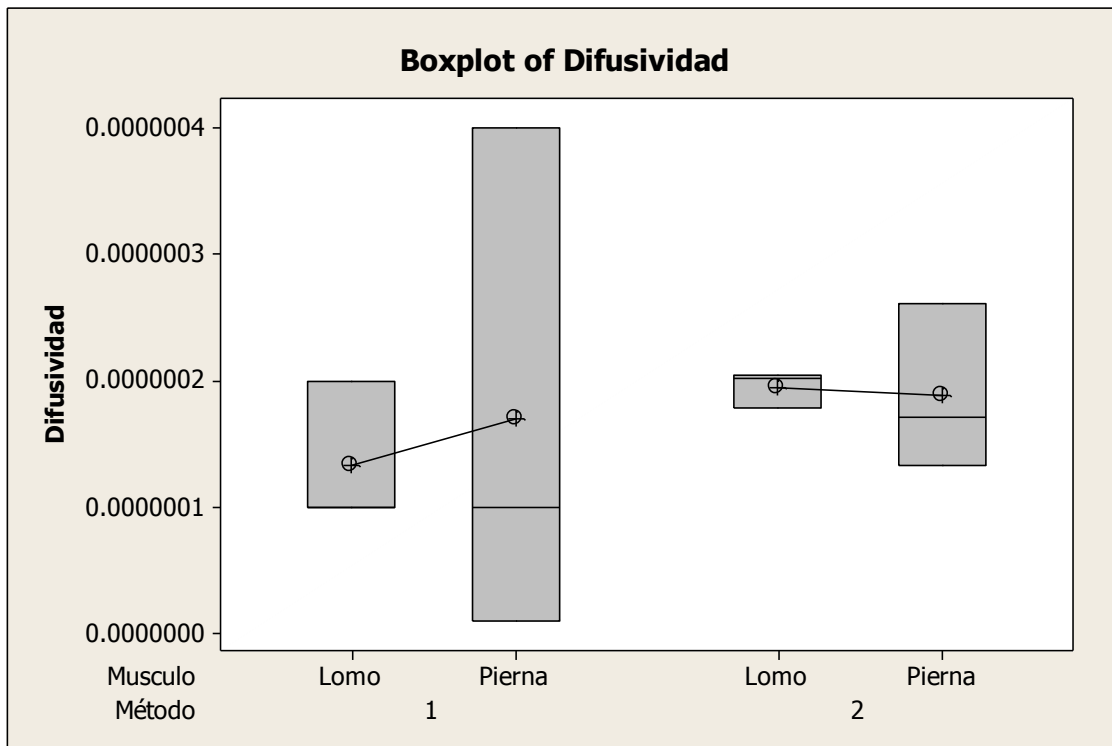


Figura 17 Interacción entre los músculos de cerdo en el cálculo de la difusividad

Conclusiones

No se cumplió lo esperado, y el músculo *Longissimus dorsi* con menor cantidad de sólidos, tendría mayor difusividad térmica y facilitaría la conducción de calor y al utilizar métodos matemáticos se tendrían valores más aproximados en el proceso de congelación.

Los cambios en las propiedades termofísicas de los dos músculos ($P > 0.05$) al momento de la evaluación, no afectaron el cálculo de la difusividad ya que los valores fueron muy similares y la cantidad de sólidos y agua no provocó dificultad en el flujo de calor para el cálculo de esta propiedad.

Si bien los dos métodos matemáticos proporcionaron valores estadísticamente similares, el método por cambio de variable presenta la historia térmica del proceso, el cual es de interés para observar cómo se va llevando a cabo la transferencia de calor en el proceso de congelación, de estos métodos se obtuvieron datos de interés para el investigador como lo fue la conductividad térmica y el calor específico, así como las relaciones que estas propiedades tienen durante la congelación.

En este trabajo se realizó una metodología experimental para englobar y relacionar todas estas propiedades termofísicas, cabe mencionar que también la mayoría de los resultados consultados en artículos son meramente teóricos, predictivos y sin algún tipo de experimentación, sin embargo los que llegan a presentar algún resultado, no muestran una metodología general para resolver la ecuación de Fourier.

Se hizo un estudio de las propiedades termofísicas de la carne mediante la revisión de diversas publicaciones “revisión del estado del arte” y se encontraron datos relacionados con estas propiedades termofísicas en procesos de congelación y a altas temperaturas, sin embargo sólo se encontraron resultados individuales, y recopilaciones.

Se resalta la importancia de haber establecido una metodología general para evaluar procesos de congelación y poder utilizarlo en el diseño de procesos y equipos, además de poder realizar otros estudios, ya que para temperaturas inferiores a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ los datos aún son escasos y como mencionan la mayoría de los trabajos revisados, son meramente predictivos.

Recomendaciones:

La metodología presentada se aplicó en un proceso a bajas temperaturas, sin embargo con los datos obtenidos se puede observar que se tienen buenos resultados en el estudio de estos. Por lo tanto sería recomendable que la metodología presentada se realizara en un proceso a altas temperaturas para la posterior recolección de datos, así como también utilizar esta metodología para estudiar otro tipo de especies pecuarias y así empezar una recolección de datos más generalizada.

Se recomienda trabajar esta metodología en músculos completos de cerdo y de ser posible en una canal completa, ya que en este proyecto se trabajó con placas infinitas, lo que podría ser una limitante en el estudio de otros músculos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alzate, C. (2003) *Procesamiento de alimentos* Col.: Universidad de Colombia Sede Manizales pp 61-80, 129-141, 217-270
- Belitz, H.D.; GROSCH, W. (1997). *Química de los alimentos*. Acribia. Zaragoza, Capitulo 12:Carne
- Bendall, J. R. 1973. *Post-mortem* changes in muscle. In: .Bourne,G.H. The structure and function of muscle.Vol.11Academic Press. New York. pp 244.
- Berk, Z. (2009) *Food Process Engineering and Technology*, USA: Academic Press, pp 200
- Cengel, Y. (2007) *Transferencia de Calor y Masa*. 3ª ed., McGraw Hill. México, D.F. pp 61-285
- Cheftel J.; Cheftel L H. (1980) *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los alimentos*, 2ª ed. Vol. 1, Editorial Acribia S.A., Zaragoza- España.
- Choi, Y., & Okos, M. R. (1986). *Food Engineering and Process Applications*. Vol. 1. Transport Phenomena, L. Elsevier, New York, 93-101.
- Chrystall, B.B. (1986). Hot processing in New Zealand. In: *Proceedings International Symposium Meat Science & Technology Lincoln Nebraska*. Franklin,K.R.,H. R. Cross National Live Stock and Meat Board. Chicago. pp 211.
- Chrystall,B.B. y C.E.Devine.1986.Electrical stimulation developments in New Zealand. *Advances in Meat Research*.Vol.1. Pearson,A.M.,T.R.Dutson.AVI Publishing Westport.CT, pp.73.
- Dutson, T.R. 1981. Electrical stimulation of *ante mortem* stressed beef. In: *The problem of dark cutting in beef*. Hood, D.E., Tarrant. P.V. and Nijhoff, M. Pub..The Netherlands. pp.253.
- Fennema, O. (2000). *Química de los alimentos*. Acribia. Zaragoza. pp 270-376

- Flores Morgado A. G. (2010) Material Didáctico sobre la transferencia de energía en estado no estacionario presentes durante el procesamiento térmico de los alimentos, tanto a altas como bajas temperaturas. , Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Franke, K. (2000). A new approach for the numerical calculation of freezing and thawing processes of foods using a modified fictitious heat flow method. *Journal of food engineering*, 44(1), 23-29.
- Geankoplis, C. J. (1978). *Mass Transport Phenomena*. pp 18, 30, 493
- Heldman, D. R. (1983). Factors influencing food freezing rates. *Food Technology*, 37(4), 103-109.
- Jeremiah, L.E. (1991). The usefulness of muscle colour and pH for segregating beef carcasses into tenderness groups. *Meat.Sci.* (30):97.
- Kern, D. (1999). Procesos de Transferencia de Calor. 31ª ed. *Mc Graw Hill. Estados Unidos*. pp 402, 650, 402, 26, 731, 754.
- Kerry, J. P. (2002). Nondestructive Measurement of Oxygen in Modified Atmosphere Packaged Hams Using a Phase-Fluorimetric Sensor System. *Journal of food Science*, 67(8), 3164-3169.
- Lamúa, M. (coord.) (2000). *Aplicación del frío a los alimentos*. AMV -Mundi Prensa, Madrid.
- Montgomery, Douglas C. (2008). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Mexico: Limusa.
- Monvoisin, A. and Coll Mas, J. (1953). *Conservación por el frío*. Barcelona: Reverté.
- Muñoz Vera, J. C. (2002) Determinación de la difusividad térmica en pasta de murta (*Ugni Molinae Turcz*), en función de la temperatura: Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

- Ochoa, O., Amézquita, A., & Chejne, F. (2005). Thermophysical Properties Of Meat-A Review. *Dyna*, 73(148), 103-118.
- Purchas, R.W., Aungsupakorn, R. (1993). Further investigations into the relationship between ultimate pH and tenderness for beef samples from bulls and steers. *Meat Sci.* (34):163.
- Rahman, R. A. (2008). A review on some organic acids additives as shelf life extenders of fresh beef cuts. *Am. J. Agric. Biol. Sci.*, 3(3), 566.
- Ramírez Juidias, E.; León Bonillo, M.J. (2009). *Predicción De Tiempos De Congelación Y Descongelación De Alimentos*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad de Sevilla.
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. (1996). *Física I-IV*, 4ª ed., México, D.F.: Editorial Patria
- SAGARPA (2011) *Carne de Cerdo: Elementos a tomar en cuenta para consumir carne de calidad (1ª ed)*, México, Querétaro: SAGARPA
- Sanz, P. D. (2003). Modelling heat transfer in high pressure food processing: a review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(2), 121-134.
- Sharma, S., Mulvaney, S. y Rizvi, S. (2003) *Ingeniería de alimentos: Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. 1ª ed., Editorial Limusa S.A. DE C.V. México, D.F.:
- Sun, D. W. & Zhu, X. (1999). Effect of heat transfer direction on the numerical prediction of beef freezing processes. *Journal of food engineering*, 42(1), 45-50.
- Sweat, V.E. (1985) Thermal properties of low- and intermediate-moisture food, ASHRAE Transactions 91 (2A), 369-390.
- Vizcarra, T. Huamán, N. (2011). Determinación De La Difusividad Térmica En Carne De Alpaca (*Lama Pacos*) En Congelación, *Ciencia gro.*, 2(2): 297-302



Young, O.A.1993. Effect of breed and ultimate pH on the odour and flavour of sheep meat. *NZJ. Agric.Res.* 36:363.

Páginas de Internet

Ramón Flores Martínez. Apuntes de Energía Térmica. Pág. 3.

http://fisicayquimicaenflash.es/eso/4eso/e_termica/e_termica03.html Visitado en mayo del 2017

Michael W King PhD 1996–2017 <http://themedicalbiochemistrypage.org/es/muscle-sp.php>

Visitado en mayo de 2017.

FAO, Directrices para el manejo, transporte y sacrificio humanitario del ganado

<http://www.fao.org/docrep/005/x6909S/x6909s04.htm> Visitado en mayo de 2017

SAGARPA, portal de exportaciones,

<http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2014B401.aspx> Visitado en mayo de 2017.

J. Mauricio Vidaurre-Ruiz. Teach Food Engineering,

<https://sites.google.com/site/jmvidaurruiz/> Visitado en mayo de 2017.

Netsch Group <https://www.netsch.com/en/> Visitado en abril de 2017.

Instituto de Seguridad Alimentaria Nutricional, Perú,

<http://www.lamolina.edu.pe/institutos/ISAN/> Visitado en junio de 2017.

Ministerio de Agricultura, Ganadería, Alimentación y Pesca Senasa,

http://www.universoporcino.com/organismos_oficiales/index.html Visitado en febrero de 2017.

**Anexos****ANEXO A. Validación de Termopares**

Termopar	Media	r	Desv. Est	R ²	CV %
1	91.468	0.9976	1.0214	0.9952	1.1167
2	91.075	0.9977	1.0286	0.9956	1.1294
3	91.631	0.9976	1.1514	0.9953	1.2566
4	91.443	0.9976	1.0422	0.9952	1.1397
5	91.431	0.9976	1.2593	0.9954	1.3773

Atributos Termopares

Termopar	r	Desv. Est	R ²	CV	Total
1	IV	V	L1	V	16
2	V	IV	V	IV	18
3	III	II	LII	II	10
4	II	III	L	III	9
5	I	I	IV	I	7

**ANEXO C. Ecuaciones de Corrección de los Termopares**

Termopar	Ecuación de corrección
1	$1.0142x - 1.5387$
2	$1.0117x - 1.4924$
3	$1.0142x - 1.4034$
4	$1.0116x - 1.3519$
5	$1.0187x - 1.7617$

ANEXO D. Ejemplo solución de Ecuación de Fourier para Difusividad Térmica

dt	DT	fi	DT/fi
0	0	-14225.6225	0
420	-1.19936095	-12565.5003	9.5449E-05
480	-2.09514085	-11056.3892	0.0001895
540	-3.09514085	-9547.17805	0.00032419
600	-3.99514085	-8188.97805	0.00048787
660	-4.89514085	-6830.77805	0.00071663
720	-5.79514085	-5472.47805	0.00105896
780	-6.69514085	-4114.27805	0.00162729
840	-7.49514085	-2906.78916	0.00257849
900	-8.29514085	-1699.60027	0.00488064
960	-8.99514085	-643.122491	0.01398667
1020	-9.79514085	564.666398	-0.01734677
1080	-10.4951409	1621.04418	-0.00647431
1140	-10.9951409	2375.39973	-0.00462875
1200	-11.4951409	3129.95529	-0.00367262
1260	-12.1951409	4186.53306	-0.00291295
1320	-12.6951409	4942.68862	-0.00256847
1380	-12.0951409	4036.82195	-0.0029962
1440	-12.0951409	4036.82195	-0.0029962
1500	-11.9951409	3885.71084	-0.00308699
1560	-11.9951409	3885.91084	-0.00308683

