



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**Efecto de la deshidratación osmótica asistida  
por sonicación en los cambios de color en carne  
de cerdo (*Longissimus dorsi*)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:**

**MÓNICA ALEJANDRA BAZÁN ESPINOSA**

**ASESORAS:**

**DRA. MARTA ELVIA ROSAS MENDOZA**

**DRA. ROSALÍA MELÉNDEZ PÉREZ**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2017**



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**

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

**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**

**Efecto de la deshidratación osmótica asistida por sonicación en los cambios de color en carne de cerdo (Longissimus dorsi).**

Que presenta la pasante: **Mónica Alejandra Bazán Espinosa**  
Con número de cuenta: **306201242** 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 06 de Octubre de 2016.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	I.Q.I. José Oscar Germán Ibarra	
<b>VOCAL</b>	Dr. José Luis Arjona Román	
<b>SECRETARIO</b>	Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza	
<b>1er. SUPLENTE</b>	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Jonathan Coria Hernández	

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

LMCF/cga\*



*Proyecto realizado con el apoyo financiero del programa DGPA-UNAM al  
proyecto PAPIIT IT201417*

## *∞ Agradecimientos ∞*

Este trabajo se lo dedico a mis padres, a mi hermano, y a los miembros de mi familia que más han influenciado en mi vida, gracias por su apoyo, confianza y cariño incondicional.

Le quiero agradecer a mis amigos con los que he compartido grandes momentos y que han estado siempre a mi lado apoyándome.

Le agradezco profundamente a la Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza, a la Dra. Rosalía Meléndez Pérez y al Dr. José Luis Arjona Román, por compartir sus conocimientos, por sus consejos y por brindarme su apoyo, tiempo, dedicación y paciencia para la realización de este proyecto.

Finalmente a mis sinodales la Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza, Dr. José Luis Arjona Román, I.Q.I José Oscar Germán Ibarra, M en C. Araceli Ulloa Saavedra y M. en C Jonathan Coria Hernández por sus consejos y tiempo invertido para la revisión de este trabajo.

***Gracias a todos, sin ustedes este logro no habría sido posible.***

# Índice

<b>Índice de figuras</b>	<b>III</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>V</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Introducción</b>	<b>VIII</b>
<b>Capítulo I: Antecedentes</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Generalidades de la carne</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Estructura básica de la carne</b>	<b>2</b>
1.2.1. Estructura del tejido muscular esquelético	2
1.2.2. Fibra muscular	3
<b>1.3. Composición química de la carne</b>	<b>5</b>
<b>1.4. Color en la carne</b>	<b>9</b>
<b>1.5. Determinación del color</b>	<b>12</b>
<b>1.6. Deshidratación osmótica</b>	<b>16</b>
1.6.1 Deshidratación osmótica en productos cárnicos	18
<b>1.7. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica</b>	<b>19</b>
1.7.1. Parámetros osmóticos y modelo cinético de Azuara	21
1.7.2. Determinación de los coeficientes de difusión efectiva de agua y sólidos para una geometría cubica	24
1.7.3. Factores que influyen en la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica	28
<b>1.8. Ultrasonido</b>	<b>30</b>

1.8.1 Efectos del ultrasonido en la carne	31
<b>Capítulo II: Metodología experimental</b>	<b>34</b>
<b>Objetivos</b>	<b>34</b>
<b>2.1. Actividades preliminares</b>	<b>35</b>
2.1.1. Sistema de deshidratación osmótica con y sin sonicación	35
2.1.2. Obtención de imágenes para la determinación de los parámetros de color	36
<b>2.2. Determinación de humedad</b>	<b>37</b>
<b>2.3. Determinación de sólidos solubles</b>	<b>38</b>
<b>2.4. Objetivo particular 1</b>	<b>39</b>
2.4.1. Deshidratación osmótica	39
2.4.2. Parámetros osmóticos y cinética de deshidratación	40
2.4.3. Coeficientes de difusión efectiva	41
2.4.4. Análisis estadístico	42
<b>2.5. Objetivo particular 2</b>	<b>43</b>
2.5.1. Determinación de los parámetros de perfil de color	43
2.5.2. Análisis estadístico	45
<b>Capítulo III: Resultados</b>	<b>46</b>
3.1. Parámetros osmóticos	46
3.2. Coeficiente de difusión de NaCl ( $D_{es}$ ) y agua ( $D_{ew}$ )	53
3.3. Parámetros de perfil de color	55
<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>

## ≈ Índice de figuras ≈

<b>Figura 1:</b> Tipos de músculos	<b>2</b>
<b>Figura 2:</b> Estructura general del músculo esquelético	<b>3</b>
<b>Figura 3:</b> Estructura la fibra muscular	<b>4</b>
<b>Figura 4:</b> Estructura del sarcómero	<b>5</b>
<b>Figura 5:</b> Estructura molecular de la <b>a)</b> miosina y <b>b)</b> actina	<b>9</b>
<b>Figura 6:</b> Estructura de la: <b>a)</b> mioglobina y <b>b)</b> del grupo hemo	<b>10</b>
<b>Figura 7:</b> Pigmentos de la carne	<b>11</b>
<b>Figura 8:</b> Espectro electromagnético	<b>12</b>
<b>Figura 9:</b> Espacio de color CIELAB: <b>a)</b> tridimensional y <b>b)</b> corte horizontal	<b>13</b>
<b>Figura 10:</b> Sistema de visión computarizada (SVC)	<b>15</b>
<b>Figura 11:</b> Diagrama de los fenómenos de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica	<b>18</b>
<b>Figura 12:</b> Mecanismo de deshidratación osmótica en un material biológico	<b>20</b>
<b>Figura 13:</b> Cavitación: generación y evolución de micro burbujas en un medio líquido	<b>31</b>
<b>Figura 14:</b> Colapso de una burbuja en una superficie sólida	<b>32</b>
<b>Figura 15:</b> Montaje del sistema de DO sin sonicación	<b>35</b>
<b>Figura 16:</b> Montaje del sistema de DO con sonicación	<b>36</b>
<b>Figura 17:</b> Montaje del sistema de visión computarizada	<b>37</b>
<b>Figura 18:</b> Sistema de DO con sonicación	<b>40</b>

<b>Figura 19:</b> Captura de fotografías	<b>43</b>
<b>Figura 20:</b> Histograma de las coordenadas colorimétricas L, a, b	<b>44</b>
<b>Figura 21:</b> Parámetros osmóticos pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) durante la deshidratación osmótica de carne de cerdo ( <i>Longissimus dorsi</i> )	<b>47</b>
<b>Figura 22:</b> Cinética de humedad para la carne deshidratada con y sin ultrasonido	<b>49</b>
<b>Figura 23:</b> Cinética de NaCl en la carne deshidratada con y sin ultrasonido	<b>50</b>
<b>Figura 24:</b> Coeficientes de difusión de agua ( $D_{ew}$ ) y NaCl ( $D_{es}$ ) <b>a)</b> sin ultrasonido y <b>b)</b> con ultrasonido	<b>54</b>
<b>Figura 25:</b> Imágenes de los cambios de color durante la deshidratación osmótica de carne de cerdo ( <i>Longissimus dorsi</i> ) <b>a)</b> sin ultrasonido y <b>b)</b> con ultrasonido	<b>56</b>
<b>Figura 26:</b> Coordenadas $L^*$ en la carne de cerdo ( <i>Longissimus dorsi</i> ) deshidratada con y sin ultrasonido	<b>57</b>
<b>Figura 27:</b> Coordenadas $a^*$ en la carne de cerdo ( <i>Longissimus dorsi</i> ) deshidratada con y sin ultrasonido	<b>58</b>
<b>Figura 28:</b> Coordenadas $b^*$ en la carne de cerdo ( <i>Longissimus dorsi</i> ) deshidratada con y sin ultrasonido	<b>59</b>
<b>Figura 29:</b> $\Delta E^*$ en la carne de cerdo ( <i>Longissimus dorsi</i> ) deshidratada con y sin ultrasonido	<b>60</b>
<b>Figura 30:</b> Diagrama cromático CIEL*a*b* y <b>b)</b> ubicación de las coordenadas polares $C^*$ y $^{\circ}H$ de la carne deshidratada con y sin sonicación en el diagrama cromático	<b>61</b>

## ❧ Índice de cuadros ❧

<b>Cuadro 1.</b> Variación del porcentaje de humedad en carne de cerdo deshidratada osmóticamente con y sin ultrasonido	<b>50</b>
<b>Cuadro 2.</b> Valores promedio de las coordenadas $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $\Delta E^*$ , croma y °Hue al inicio y al final del proceso de deshidratación con y sin ultrasonido	<b>60</b>

## ∞ Abreviaturas ∞

<b>DO</b>	Deshidratación osmótica
<b>US</b>	Ultrasonido
<b>CRA</b>	Capacidad de retención de agua
<b>WL</b>	Pérdida de agua
<b>SG</b>	Ganancia de sólidos
<b><math>D_{es}</math></b>	Coefficiente de difusión de sólidos
<b><math>D_{ew}</math></b>	Coefficiente de difusión de agua
<b>SVC</b>	Sistema de Visión Computarizada
<b>CIE</b>	Commission Internationale de l'Eclairage
<b><math>L^*</math></b>	Luminosidad
<b><math>a^*</math></b>	Rojo (+) y verde (-)
<b><math>b^*</math></b>	Amarillo (+) y azul (-)
<b><math>^{\circ}H</math></b>	Ángulo Hue
<b><math>\Delta E^*</math></b>	Diferencia total de color
<b><math>C^*</math></b>	Croma

## Resumen

La carne es un alimento de gran demanda y con un periodo de vida útil corto, por lo tanto la industria alimentaria está impulsando la creación de nuevos métodos de conservación que aumenten su vida de anaquel. Los mayores avances en este campo se han conseguido con la aplicación de sistemas físicos, que retardan el proceso de descomposición o putrefacción generada por la proliferación de microorganismos, sin un incremento sustancial de la temperatura del alimento. Estos métodos conocidos como no térmicos, no afectan o lo hacen mínimamente a las características nutritivas y sensoriales. Entre las tecnologías de esta naturaleza se encuentran el ultrasonido (US), también conocido como sonicación.

En la actualidad existe una gran variedad de trabajos que estudian la deshidratación osmótica de carne asistida con ultrasonido, sin embargo la mayoría se focalizan al estudio de la transferencia de masa que ocurre durante el proceso, dejando de lado las secuelas que tienen el ultrasonido en las propiedades organolépticas. Por lo tanto la razón de este proyecto fue evaluar los efectos que tiene el uso del ultrasonido durante la deshidratación osmótica y los cambios de color que ocurren en la carne.

Carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) fue deshidratada osmóticamente a través de dos tratamientos, deshidratación osmótica con sonicación y sin sonicación (estática). La carne fue cortada en cubos de 2 cm, los cuales se deshidrataron durante 2 horas en una solución osmótica de NaCl al 17% (200 g/L) a una temperatura de 10 °C. Durante la deshidratación osmótica asistida con sonicación se utilizó una frecuencia de 40 kHz. Una vez terminado el proceso de deshidratación se determinaron los parámetros osmóticos: pérdida de agua (WL), la ganancia de sólidos (SG), los coeficientes de difusión de agua ( $D_{ew}$ ) y sólidos ( $D_{es}$ ) y los cambios de color en las muestras, para evaluar la influencia que tiene el uso del ultrasonido en estos parámetros. Los cambios de color se evaluaron mediante el sistema de visión computarizada (SVC) en términos de las coordenadas CIEL\*a\*b\*,  $\Delta E^*$ , croma y ángulo hue.

Los resultados obtenidos indicaron que el uso de sonicación incrementa la transferencia de masa y provoca mayores cambios de color, debido a las alteraciones que provoca el fenómeno de cavitación en la estructura de la carne.

## ≈ Introducción ≈

La carne es uno de los alimentos más valorados desde el punto de vista nutricional. Su importancia deriva de sus proteínas de alta calidad, que contienen todos los aminoácidos esenciales, así como de sus minerales y vitaminas de elevada biodisponibilidad. Al conocerse su valor nutricional la demanda por su consumo ha ido en aumento, esto para la industria alimentaria representa un oportunidad de desarrollar nuevas tecnologías de producción, transformación y de conservación para satisfacer dicha demanda.

Aunque la industria alimentaria cuenta con una gran variedad de métodos de conservación (secado por aire caliente, congelación liofilización, etc.), la mayoría se basan en la aplicación de altas y bajas temperaturas; esto conduce al deterioro de los atributos sensoriales, tales como, color, olor, textura, sabor, etc. y también a una pérdida de nutrientes. Como resultado la industria ha puesto interés en la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a reducir en lo posible este tipo de efectos no deseados, con la finalidad de brindar productos de mejor calidad que traigan un beneficio a los consumidores, así como modernizar y mejorar los procesos de conservación existentes en la industria.

La deshidratación osmótica es uno de los métodos de conservación más antiguos y es considerado como un proceso no térmico, que consiste en la eliminación parcial del contenido de agua del alimento mediante su inmersión en soluciones concentradas de solutos. Este proceso se ha considerado como una alternativa potencial para la conservación de alimentos, que a pesar de ser un método que ha sido ampliamente utilizado, aún tiene ciertas limitaciones y dificultades al momento de aplicarse en algunos campos específicos. Estos obstáculos pueden considerarse como desafíos o nuevas oportunidades para mejorar el proceso de deshidratación osmótica, sin embargo algunos de estos podrían superarse mediante la aplicación de nuevas tecnologías, dentro de las cuales se encuentra el ultrasonido.

En la industria de los alimentos la aplicación de ultrasonido durante la deshidratación osmótica se emplea principalmente en frutas y verduras, no obstante existen algunas aplicaciones en carne. Diferentes investigaciones han demostrado que la aplicación de ondas ultrasónicas causa una modificación en las células del alimento; este efecto que

ocasiona el ultrasonido en el tejido del alimento es de gran utilidad durante deshidratación osmótica ya que puede acelerar la transferencia de masa provocando una disminución en el tiempo de proceso, haciéndolo más eficiente debido a la reducción del consumo de energía y la disminución de los costos tanto financieros como ambientales.

Además de los beneficios anteriormente mencionados, también se ha demostrado que la aplicación de ultrasonido durante el proceso de deshidratación osmótica de carne mejora la calidad del producto, ya que ambos métodos al ser procesos no térmicos, aseguran la conservación del alimento manteniendo su valor nutricional y sus características organolépticas (color, textura, sabor) sin cambios significativos. Conservar las propiedades sensoriales de los alimentos es fundamental, en el caso específico de la carne, el color es una de las características más importantes, ya que esta propiedad sensorial ésta relacionada con la calidad del producto y es la primera impresión que tiene el consumidor con cualquier producto cárnico, condicionando su preferencia e influenciado su elección.

Por lo tanto es importante profundizar en los efectos que trae el uso de ultrasonido durante la deshidratación osmótica, ya que su aplicación podría permitir la creación de nuevos métodos de conservación, así como el desarrollo productos de mayor calidad.

# Capítulo 1

## Antecedentes

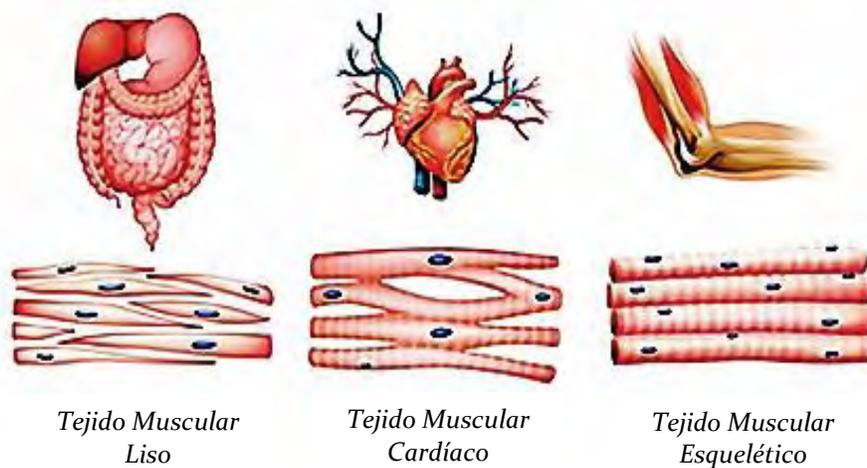
### 1.1 Generalidades de la carne

De todos los recursos obtenidos de la agricultura, la carne constituye en muchos países el sector económico más importante. Además la industria cárnica también representa un porcentaje no despreciable de la industria alimentaria global. El progreso de las investigaciones sobre su valor nutricional ha revalorizado la importancia de este grupo alimenticio, ya que por su composición química, la carne ofrece una gran abundancia de sustancias que desempeñan en el organismo humano la función de nutrientes; debido a esto, se ha incrementado su consumo y sitúa a los productos cárnicos en un lugar relevante dentro del ámbito de la alimentación humana (*Anchía & Hernández, 2000*).

Desde el punto de vista bromatológico, la carne es el resultado de la transformación experimentada por el tejido muscular animal, esta transformación es originada por una serie concatenada de procesos fisicoquímicos y bioquímicos, que se desarrollan como consecuencia del sacrificio animal. Estos procesos incide sobre el color, la textura, la jugosidad, el sabor y el aroma del producto resultante, que es lo que se denomina carne (*Anchía & Hernández, 2000*). Por otro lado la *NOM-009-Zoo-1994* define como carne a la estructura compuesta por fibras musculares estriadas, acompañadas o no de tejido conjuntivo elástico, grasa, fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos, de las especies animales autorizadas para el consumo humano: bovinos, porcinos, ovinos, por mencionar los más comunes.

## 1.2 Estructura básica de la carne

Existen 3 tipos de músculos: liso involuntario, cardíaco (músculo estriado involuntario) y esquelético (estriado voluntario); estos dos últimos se denominan también estriados debido a que presentan unas bandas transversales en su estructura (*Figura 1*). El músculo liso presenta un funcionamiento involuntario y se encuentra localizado en el sistema gastrointestinal, cardiovascular y en el aparato respiratorio, formando parte de las paredes de los vasos sanguíneos. El músculo cardíaco se limita sólo al corazón y en la raíz de los vasos sanguíneos que se unen a este órgano, siendo involuntario y su principal función es la de convertir la energía química presente en energía mecánica. El músculo esquelético es el principal componente de la carne por lo cual se requiere conocer a detalle, tanto su estructura como su funcionamiento, si se quiere comprender mejor los cambios que tienen lugar durante la transformación de músculo en carne (*Limas, 2011*).



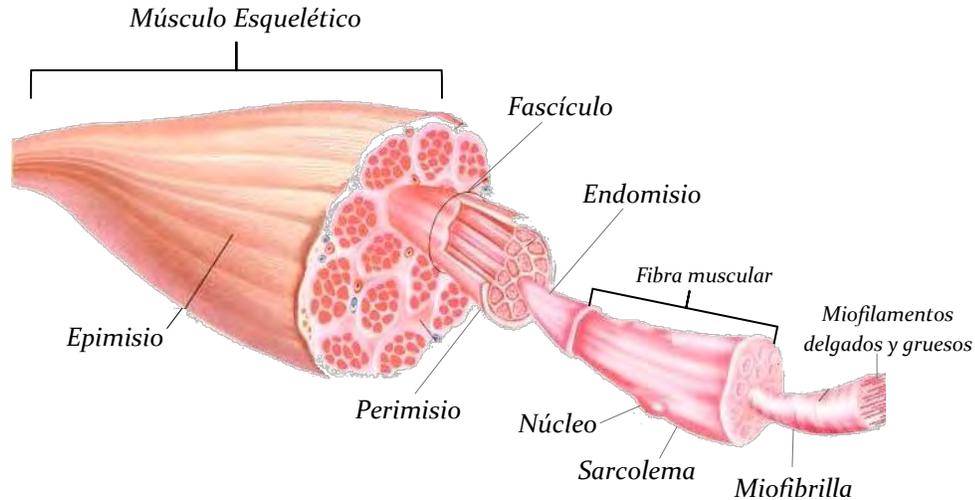
*Figura 1: Tipos de músculos*

*Fuente:* <http://www.bioenciclopedia.com/wp-content/uploads/2015/06/tipos-musculo.jpg>

### 1.2.1 Estructura del tejido muscular esquelético

La estructura del músculo esquelético es muy compleja; como se puede observar en la *Figura 2*, los músculos están formados por la unión de numerosas fibras musculares. Una delicada red de fibras de colágeno forman el tejido conectivo conocido como endomisio, el cual recubre cada fibra muscular de forma individual, las protege y les da la firmeza necesaria; el endomisio no debe ser confundido con el sarcolema o membrana de la fibra muscular. A su vez las fibras musculares están organizadas en haces o fascículos primarios que están cubiertos por otro capa de tejido conectivo, esta vez más gruesa, denominada como el perimisio. Posteriormente los fascículos

primarios se agrupan en fascículos secundarios, que están protegidos por el epimisio, que es la capa más gruesa de tejido conectivo que cubre al músculo esquelético (Moore & Agur, 2003).



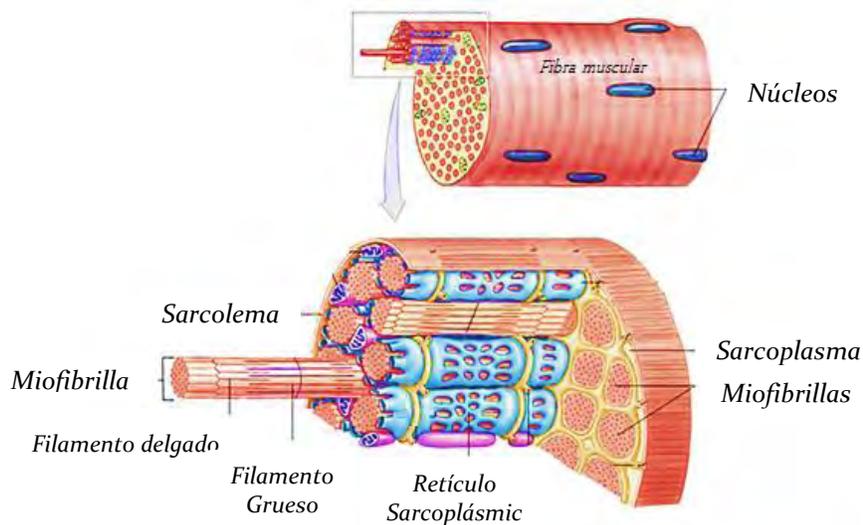
**Figura 2:** Estructura general del músculo esquelético

**Fuente:** Moore & Agur, 2003

### 1.2.2 Fibra muscular

Las células cilíndricas que forman el músculo esquelético se denominan fibras musculares, estas son células muy especializadas y son la unidad estructural esencial de los músculos, ya que constituyen del 75 al 92% del volumen total del músculo (Tornberg, 2005). En la figura 3 se observa esquemáticamente los niveles de organización estructural de la fibra muscular. La membrana que rodea la fibra muscular se llama sarcolema, la cual se encuentra situada bajo el endomisio. Las fibras musculares son células multinucleadas; los núcleos son alargados y están dispuestos en la región periférica de la célula, por debajo del sarcolema y a lo largo de toda la fibra. El citoplasma se denominada sarcoplasma, y contiene haces de filamentos fuertemente empaquetados, estos filamentos se denominan miofibrillas. Cada fibra muscular; contiene varios millones de miofibrillas, que son elementos intracelulares, largos, contráctiles que se extienden a lo largo de la fibra muscular y son orgánulos únicos del tejido muscular, responsables de la apariencia estriada del músculo esquelético. Las miofibrillas se encuentran recubiertas por una compleja organización de túbulos y vesículas llamada retículo sarcoplásmico que desempeña un papel importante en el mecanismo de contracción y relajación muscular. A su vez, cada miofibrilla está compuesta por unidades más finas conocidas como miofilamentos los cuales están constituidos por proteínas. Los miofilamentos son de dos tipos: gruesos

que están formados principalmente por miosina y los filamentos delgados están constituidos por actina (Silverthorn et al., 2009; Pertierra et al., 2006).



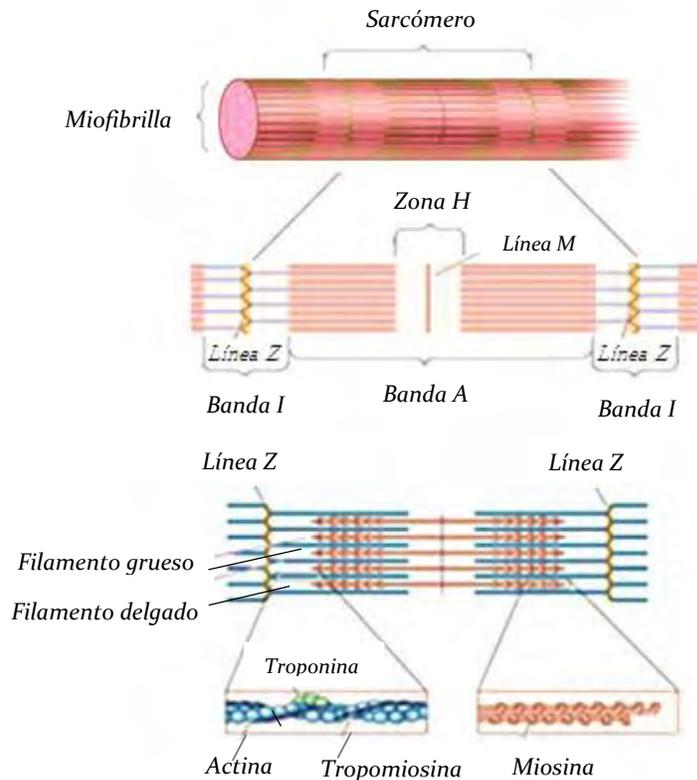
**Figura 3:** Estructura de la fibra muscular.

**Fuente:** Adaptada a <http://faculty.etsu.edu/forsman/histologyofmuscleforweb.htm>

La unidad estructural de una miofibrilla es el sarcómero, que es la región comprendida entre dos líneas Z adyacentes, constituye la unidad fisiológica elemental de la contracción muscular y presenta una alternancia de bandas claras y oscuras como consecuencia de la distribución de los filamentos gruesos y delgados. En la *figura 4* se puede observar la estructura del sarcómero, en donde:

- Las bandas A, reciben su nombre por ser anisotrópicas u oscuras. Están formadas por los llamados filamentos gruesos, constituidos casi completamente de miosina. Los filamentos gruesos se organizan de tal modo que las cabezas de las moléculas de miosina se disponen radialmente hacia los extremos y en la región central se agrupan las colas de la miosina.
- Las bandas I, son llamadas así por ser isotrópicas o claras. Son las menos densas de toda la miofibrilla, ya que contienen solamente los miofilamentos delgados constituidos por actina.
- La línea Z se localiza en el centro de cada banda I, llamada así por la palabra en alemán *Zwischen* que significa “entre”. En la línea Z se sostienen los miofilamentos delgados.
- La zona H es la parte central de cada banda A. La zona H es menos densa que el resto de la banda A porque es la región central entre las terminaciones de los miofilamentos de miosina. El ancho de la zona H varía con el estado de contracción del músculo

- e) La línea M, es la línea oscura en el centro de la zona H. En la línea M cada miofilamento grueso se unen con otro miofilamento grueso adyacente, formando conexiones (Limas, 2011).



**Figura 4:** Estructura del sarcómero

Fuente: Adaptada de <http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Histologia/epitelio22.php>

### 1.3 Composición química de la carne

El tejido muscular por lo general está constituido por 75% agua, 20% proteínas, 3% grasa y 2% de sustancias solubles no proteicas. Del 2% de las sustancias solubles no proteicas, los metales y los minerales representan un 3%, las sustancias nitrogenadas no proteicas el 45%, los carbohidratos un 34% y los compuestos inorgánicos un 18% (Tornberg, 2005).

**Agua:** es el componente más abundante de la carne, se ha estimado que el 70% del agua en la carne fresca se localiza dentro de las miofibrillas, el 20% en el sarcoplasma y el 10% en el tejido conectivo (Andújar, Pérez & Venegas, 2003).

Se sabe que el agua del tejido muscular puede encontrarse en diferentes formas, con distinta movilidad y se localiza en diversas zonas: a) en las proteínas musculares, generalmente como agua enlazada de una manera directa a sus grupos hidrófilos; b)

en los espacios localizados entre los filamentos gruesos y delgados; c) en los espacios interfibrilares dentro del sarcoplasma bajo las formas libres y enlazadas y d) en el espacio extracelular. En consecuencia, pueden señalarse diversas formas para las moléculas de agua contenida en el tejido muscular, aun cuando entre ellas no existan delimitaciones claras:

- **Agua ligada o agua de constitución:** se denomina así a la que forma parte de la carne sin posibilidad de ser extraída, y que suele representar solamente el 4-5% del contenido acuoso total. Se trata de una cantidad de agua enlazada que puede desempeñar un papel importante en la tecnología del procesamiento de productos cárnicos, al contribuir a la estabilidad de las formas moleculares proteicas durante la desecación.
- **Agua libre:** corresponde a las moléculas de agua que se mantienen en el músculo retenidas solamente por fuerzas superficiales (*Hernández & López 2010*).

**Lípidos:** en la carne el tejido adiposo se presenta como grasa subcutánea e intramuscular (*Nollet & Toldra, 2009*). En la grasa intramuscular se diferencia la grasa intracelular, que se encuentra situada dentro de las fibras musculares. La grasa intracelular forma parte de las estructuras celulares del sarcolema, retículo sarcoplásmico, etc. y está constituida principalmente por fosfolípidos y algunos triglicéridos de la grasa visible. La grasa visible se encuentra situada entre las fibras musculares (grasa infiltrada), está formada por triglicéridos y que aporta el aspecto vetado conocido como marmoleado (*Hui & Sherkat, 2005*).

**Carbohidratos:** su contenido generalmente es muy pequeño alrededor de 1% de la masa muscular. Los tejidos animales contienen carbohidratos que se encuentran libres o formando parte de otros compuestos: la glucosa y ribosa, son azúcares presentes en la carne. Entre los polisacáridos de más importancia está el glucógeno, que se almacena en el músculo esquelético como sustancia de reserva energética (*Armeling 2001*).

**Vitaminas:** las vitaminas se pueden clasificar en liposolubles e hidrosoluble. Dentro de las liposolubles se encuentra la vitamina A, D, E y K; mientras que dentro de las hidrosolubles se encuentran las vitaminas del complejo B y la vitamina C. La carne es una excelente fuente del complejo B (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>, B<sub>9</sub> y B<sub>12</sub>), pero tiene poca cantidad de las vitaminas liposolubles y vitamina C (*Pearson & Tauber, 1984*).

**Minerales:** la carne es considerada como una fuente importante de componentes minerales esenciales, por su contenido de hierro, zinc, cobre, yodo, magnesio, fósforo, selenio, etc. Entre los minerales aportados destaca el hierro por su disponibilidad, dos

terceras partes del hierro de la carne se encuentra en forma hemo (presente en la mioglobina y hemoglobina) y es un mineral fácilmente asimilable (Romero, 2013).

**Proteínas:** es el componente más importante de la carne y en contenido ocupa el segundo lugar después del agua. Desempeñan un papel fundamental en las funciones fisiológicas *in vivo*, en los cambios que se originan después de la muerte del animal y en las propiedades de la carne para su consumo, tanto fresco como industrializado (Armeling, 2001).

Las proteínas son macromoléculas formadas por cadenas lineales de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. Existen diversos métodos para clasificar las proteínas, una de ellas es por su forma y otra es por su procedencia.

Por su forma se clasifican en globulares y fibrosas: en el primer caso presentan una estructura esférica por el doblamiento de su cadena, de tal manera que integran un modelo tridimensional redondo, en esta categoría se encuentra la mioglobina, proteína que le proporciona color a la carne. Las proteínas fibrosas son aquellas proteínas insolubles en agua que le proporcionan rigidez a los tejidos, la miosina y actina son proteínas de la carne de este tipo (Badui, 1990).

De acuerdo con su procedencia las proteínas del músculo se clasifican en: sarcoplásmicas, miofibrilares y del tejido conectivo. Las proteínas miofibrilares constituyen entre 50% y 55 % del total de proteínas, mientras que las sarcoplásmicas aproximadamente 30%-40%. El 10%-15% que resta pertenecen a las proteínas del tejido conectivo (Tornberg, 2005).

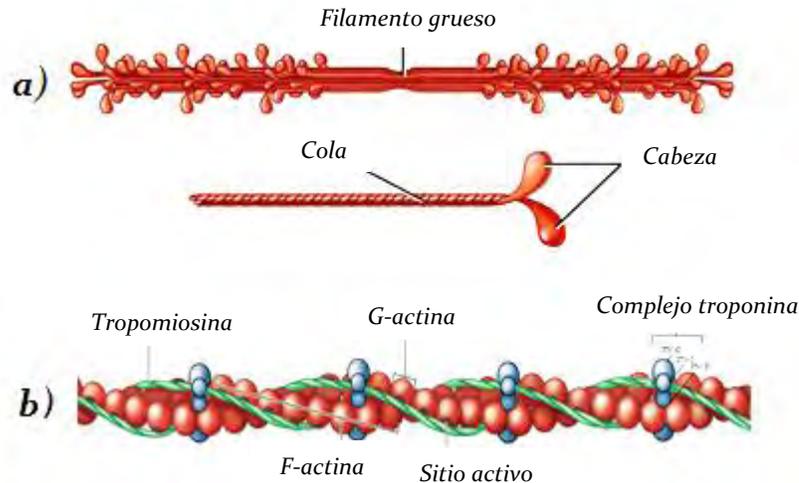
#### a) Proteínas miofibrilares

Son las que conforman la estructura de las miofibrillas, son solubles en soluciones salinas concentradas pero insolubles en agua. Estas proteínas se pueden clasificar en contráctiles y reguladoras (Phillips & Williams, 2011). Entre las principales se encuentran:

- **Miosina (contráctil):** es la más abundante de las proteínas miofibrilares y se encuentra en los miofilamentos gruesos. La estructura de la miosina es de una varilla alargada, llamada región de la cola, con una porción gruesa al final, llamada región de la cabeza (Figura 5a). La región de cola presenta una estructura helicoidal- $\alpha$  mientras que la cabeza presenta una estructura globular. Durante la contracción muscular las cabezas son los sitios funcionalmente activos de los miofilamentos gruesos, puesto que estas forman puentes cruzados con los miofilamentos de actina. Durante la contracción muscular cada cabeza de miosina se une a una molécula de actina-G del

miofilamento de actina. La formación de puentes mediante esta interacción entre la actina y la miosina forman el complejo *actomiosina*, este complejo permite la realización del trabajo mecánico del músculo. Esta interacción entre miosina actina se activa por iones de calcio, pero que se inhibe con el magnesio (Andújar, Pérez & Venegas, 2003).

- La **Actomiosina**: es un complejo de dos proteínas: la actina y la miosina. Se forma cuando ocurre la contracción muscular en el músculo vivo o en pre-rigor y cuando ocurre el rigor mortis. La formación de la actomiosina de lugar a un estado de rigidez y de relativa inextensibilidad muscular (Silverthorn et al., 2009).
- **Actina (contráctil)**: Es una proteína globular y puede existir en dos formas: actina globular (G) y actina fibrosa (F), es la segunda proteína miofibrilar más importante y principal componente de los miofilamentos delgados. Cada monómero de actina G contiene sitios de unión para monómeros de actina, miosina, tropomiosina, troponina, ATP y cationes. La actina F es una proteína fibrosa que se forma por la unión de 300 o más monómeros de actina G. En los músculos esqueléticos el filamento delgado se compone de dos bandas de polímero de actina F entrelazados con la configuración de una hélice de doble cadena (Gal et al., 2007).
- **Tropomiosina (reguladora)**: es un polímero alargado de proteínas que se extiende a lo largo de siete subunidades de actina G (Figura 5b). La tropomiosina mantiene cubiertos los sitios activos de las moléculas de actina mientras el músculo no está en contracción. Para que la contracción de inicio, el filamento de tropomiosina debe desplazarse y descubrir los sitios activos de la actina (Sicar, Coter & Salazar, 2012).
- **Troponina (reguladora)**: se trata de un complejo de proteínas globulares que se encuentra en los filamentos delgados. El complejo proteico está integrado por tres componentes: troponina fijadora de iones de calcio, se le denomina troponina C (TN-C), troponina inhibidora, denominada como troponina I (TN-I) inhibe la unión de actina-miosina y troponina T (TN-T) fijadora de actina, se encarga de estar unida permanentemente a la tropomiosina (Figura 5b). Cada grupo molecular del complejo troponina se asienta sobre la tropomiosina a intervalos repetidos de siete unidades de actina G. Desempeña un papel importante en el proceso de la contracción y la relajación muscular (Bello, 2008).



**Figura 5:** Estructura molecular de la **a)** miosina y **b)** actina  
**Fuente:** <http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/10-Sistema%20Motor/10a-Movimiento/Textos/MuscAnatomia.html>

### b) Proteínas del tejido conectivo

Las proteínas del tejido conectivo son insolubles en agua y tiene como función la protección mecánica del organismo así como la de conectar músculos, órganos y otras estructuras del esqueleto. Estas proteínas son las que forman los tejidos conectivos del músculo como el epimisio, perimisio endomisio. Entre las proteínas del tejido conectivo cabe destacar el colágeno, que es abundante en el tejido conectivo muscular e influye en la dureza de la carne (Rivera & Magro, 2008).

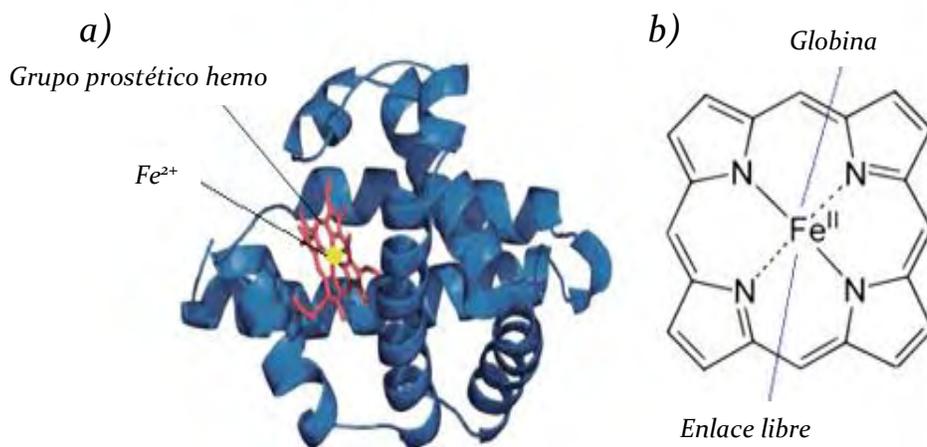
### c) Proteínas sarcoplásmicas

Corresponde aproximadamente del 30% al 35% del total de proteínas del músculo, presentan una estructura globular, son solubles en agua y se encuentran en el sarcoplasma de la fibra muscular, dentro de este tipo de proteínas la más importante es la mioglobina (Romero, 2013).

## 1.4 Color en la carne

Los pigmentos de la carne están formados en su mayor parte por dos proteínas, la mioglobina que se encuentra en las células musculares y la hemoglobina que es el pigmento de la sangre. La mioglobina es una proteína globular sarcoplásmica, soluble en agua y en soluciones salinas diluidas. Presenta una estructura terciaria y está constituida por una parte proteínica, llamada *globina* que está integrada por 8 segmentos con  $\alpha$ -hélices unidas por secciones no helicoidales y el grupo prostético (parte no proteica) *hemo* (figura 6a). La parte no proteica de la mioglobina, se

compone de un anillo de porfirina plano y un átomo de hierro central. El átomo de hierro tiene seis puntos de enlace o uniones de coordinación. Cuatro de estos enlaces están ligados a átomos de nitrógeno, el quinto está unido a la molécula de globina y el sexto enlace está libre para ligarse a otras sustancias, ordinariamente agua u oxígeno (figura 6b). El grupo hemo es el componente de los hemopigmentos que en realidad proporcionan el color, sus dobles enlaces conjugados son los que poseen la capacidad de absorber luz y tanto la mioglobina como la hemoglobina lo poseen (Mancini & Hunt, 2005; Labra 2014; Fernández, 2007).



**Figura 6:** **a)** Estructura de la mioglobina consiste en ocho  $\alpha$ - hélices (azul) que se despliegan alrededor de un grupo central que contiene un anillo hemo (rojo). **b)** estructura del grupo hemo

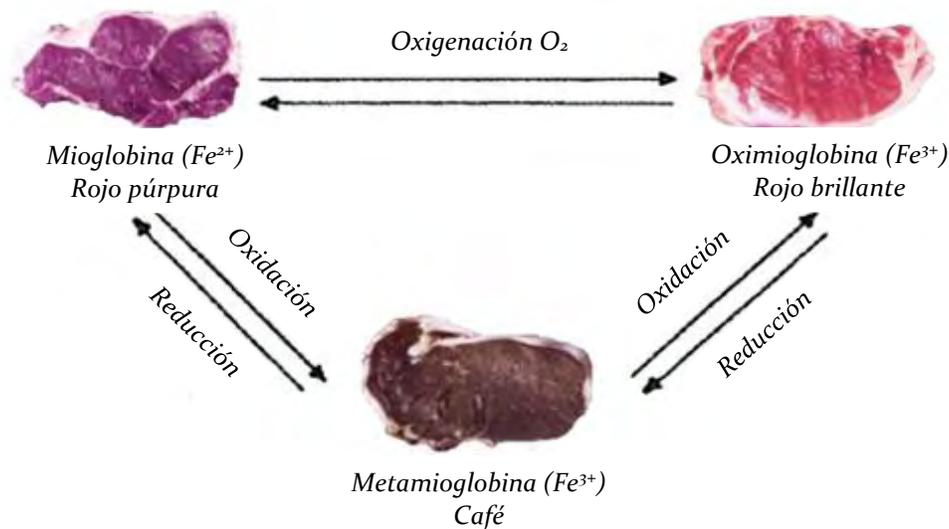
**Fuente:** Labra 2014; Fernández, 2007

El color del pigmento en la carne depende de al menos tres factores:

- 1) El estado de oxidación del átomo de hierro. Puede estar reducido ( $\text{Fe}^{2+}$ ) u oxidado ( $\text{Fe}^{3+}$ ).
- 2) La naturaleza del grupo en el sexto enlace del átomo de hierro. Ese grupo suele ser oxígeno o agua.
- 3) El estado de la globina. Puede ser la original como en la carne fresca, o desnaturalizada como en la carne cocida.

El color de la carne está determinada esencialmente por dos niveles de oxidación del átomo de hierro del grupo hemo. Cuando el hierro ferroso del grupo hemo carece del sexto ligante, el pigmento es llamado *desoximioglobina* y es de color púrpura (color inicial de la mioglobina antes de ser expuesta al aire) como se puede observar en la (figura 7). Esa variante de la mioglobina, en presencia de oxígeno (alta presión) se convierte en *oximioglobina*, ocupando el  $\text{O}_2$  la sexta posición del  $\text{Fe}^{2+}$  y es responsable de la apariencia rojo cereza o brillante de la carne fresca. Las dos formas reducidas de

la mioglobina se oxidan a bajas presiones de  $O_2$ : el  $Fe^{2+}$  pasa a  $Fe^{3+}$ , formándose *metamioglobina* de color marrón, en la que el agua ocupa el sexto enlace (Andújar, Pérez & Venegas, 2003; AMSA, 2012). Estas modificaciones se pueden observar cuando se corta la carne fresca y la superficie se expone al aire; conforme el oxígeno del aire entra en contacto con la superficie expuesta de la carne este se absorbe y se liga al hierro. El color de la superficie de la carne cambia conforme la mioglobina se oxigena formando la oximioglobina, y le da a la carne el color rojo brillante; posteriormente ocurre la oxidación y se produce la metamioglobina. En la mayoría de los casos se desea conservar el color de la oximioglobina ya que los consumidores asocian este color con la frescura (Badui, 1990).

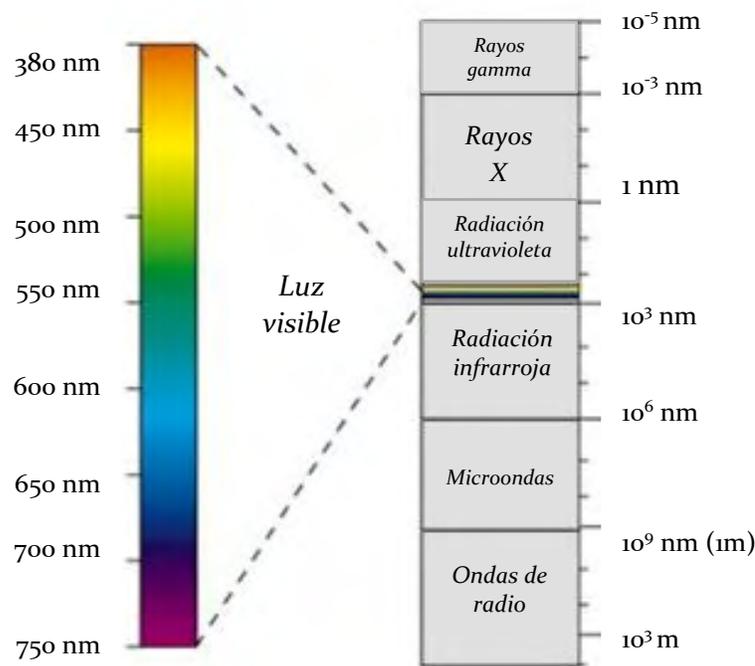


**Figura 7:** Pigmentos de la carne.  
Fuente: Adaptada a Badui, 1990.

La cantidad de mioglobina que contiene un músculo dependerá de varios factores, tales como: la especie, edad y sexo del animal, la función que desarrolle el músculo, la intensidad de irrigación de sangre que recibe y la capacidad que tiene el músculo de almacenar el oxígeno. Los músculos sometidos a un gran esfuerzo presentan un metabolismo energético intenso, por lo que disponen de un alto contenido de mioglobina. Por estas razones, hay músculos más pigmentados que otros, como es el caso del corazón que es más rojo que cualquier otro tejido. En general, la carne de cerdo presentan una baja concentración de mioglobina (0.06 a 0.10%) y su color es claro o pálido; mientras que la carne de res es de las más oscuras presenta un contenido de 0.5 a 1.0%. Los animales más viejos presentan el límite superior de mioglobina en sus músculos (Badui, 1990).

## 1.5 Determinación del color

El color de un objeto no es una propiedad física del mismo, desde el punto de vista físico, para poder percibir el color, se necesitan de tres factores: una fuente de luz, un objeto y un receptor. Todo cuerpo iluminado absorbe una parte de las ondas electromagnéticas y refleja las restantes. Las ondas reflejas son captadas por la retina, posteriormente el nervio óptico las transmite al cerebro donde este último las integra como colores según las longitudes de ondas correspondientes. La proporción de luz que es reflejada por el objeto puede variar según la longitud de onda de la luz incidente, debido a que los pigmentos absorben diferentes longitudes. Las ondas electromagnéticas para las cuales el ojo humano está adaptado, se encuentran entre longitudes que van de 400 nm (violetas) a 700 nm (rojo) del espectro electromagnético (figura 8), pero existen ondas que el ojo no puede percibir como las ultravioletas e infrarrojas (Fernández, 2007).



**Figura 8:** Espectro electromagnético

Fuente: Adaptada a <http://www.pion.cz/es/article/?catID=33>

El ojo humano puede percibir millones de colores, además cada persona los percibe de distintas maneras. Determinar un color es una interpretación subjetiva, por otra parte la edad, el cansancio de la vista y otros factores tanto fisiológicos como externos (cantidad de luz, entorno, etc.) pueden influir en la manera en que captamos un color.

Por estas razones es importante que tengamos diferentes sistemas que nos permitan expresar y evaluar de forma precisa los colores (Zelanski & Fisher, 2009).

Cada color tiene una apariencia propia basada en tres elementos: matiz, saturación y luminosidad. A través de estos tres atributos se identifica con precisión un color específico y se puede distinguir de cualquier otro. El Matiz se refiere al color básico de un objeto, la saturación (croma) describe la pureza del color y la brillantez (luminosidad) hace referencia a la capacidad de un color para reflejar la luz blanca que incide en él y alude a la claridad u oscuridad de un tono (Anónimo, Abril 2003).

A pesar de su naturaleza subjetiva, el color puede ser descrito de manera exacta mediante los diferentes modelos de color que existen. La Comisión Internacional de la Iluminación, (traducción del francés Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)), desarrolló un espacio de color tridimensional llamado  $L^*a^*b^*$  (figura 9a). En este modelo, el eje (a) se extiende desde el verde ( $-a^*$ ) hacia el rojo ( $+a^*$ ) y el eje (b) desde el azul ( $-b^*$ ) hacia el amarillo ( $+b^*$ ). La luminosidad ( $L^*$ ) en este modelo tridimensional aumenta desde el polo inferior al polo superior, siendo el valor de 100 para el color blanco y 0 para el negro). Un corte horizontal en el modelo CIELAB (figura 9b) revela un plano, el cual representa todos los valores en la misma brillantez. Este espacio de color es exacto ya que la misma combinación de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , siempre se referirá al mismo color (Anónimo, Marzo 2003).

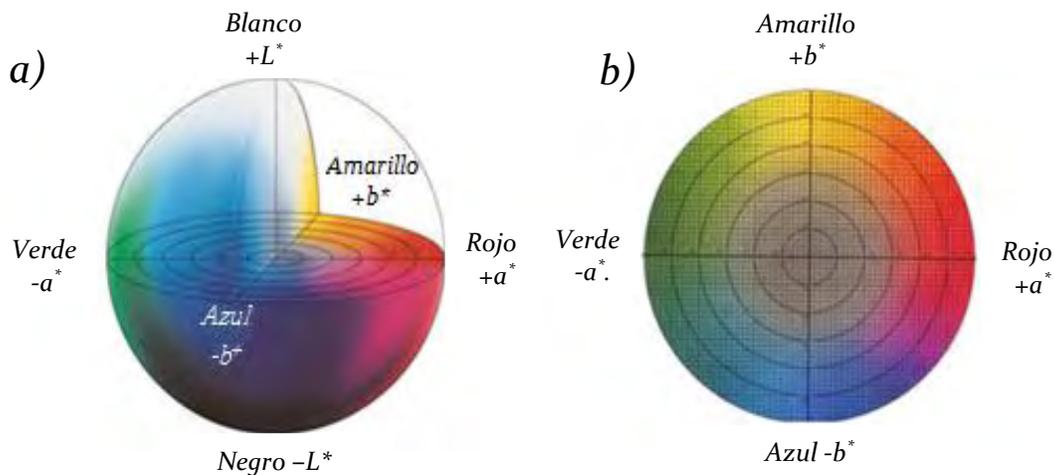


Figura 9: Espacio de color CIELAB: a) tridimensional y b) corte horizontal

Fuente: <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>

Los sistemas para la medición del color pueden ser de dos tipos: subjetivos (apreciación visual humana) y objetivos (análisis instrumental). En el primero se determina el color mediante la comparación visual del objeto a medir con colores

previamente catalogados y cuantificados, mientras que en el segundo hay que hacer uso de medidas físicas (espectro visible) (Fernández, 2007).

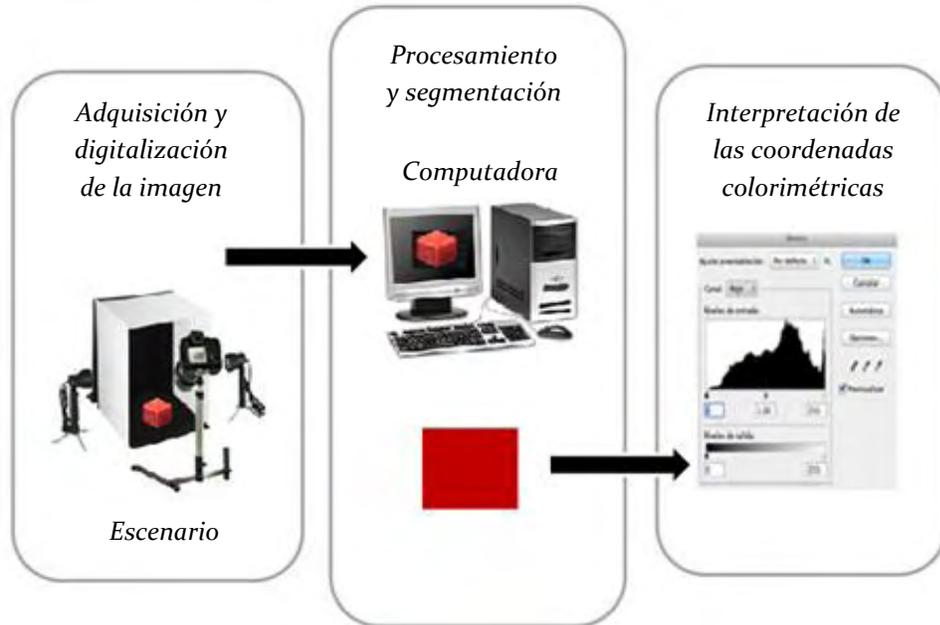
Para determinar el color de una muestra existen diferentes instrumentos como: los colorímetros y los espectrofotómetros, ambos miden el color con gran exactitud, no obstante, estos equipos tienen un alto costo económico (Pereira, 2009). Sin embargo, para la mayoría de nosotros es incuestionable que nos encontramos inmersos en una gran revolución tecnológica, actualmente muchos dispositivos de uso común en la sociedad, tales como monitores, impresoras, escáneres, cámaras, videocámaras, etc., reproducen imágenes a color con la mayor precisión y fidelidad posible. La aparición de estas nuevas tecnologías ha permitido el desarrollo de nuevos métodos para la determinación del color (Artigas, Capilla & Pujol, 2002).

Diversos autores como Yam & Papadakis (2004), Mancini & Hunt (2005), Pereira & León (2012) y Riva et al. (2005) han aprovechado estos avances tecnológicos y han determinado el color en diferentes alimentos por medio del sistema de visión computarizada (SVC), el cual es un método simple que se basa en el análisis de imágenes digitales.

Para el procesamiento de imágenes por medio del SVC se requiere la instalación de un escenario con condiciones de iluminación adecuadas, una cámara digital para la captación de imágenes, y un computador (Figura 10). Así mismo, requiere un software para el procesamiento digital de imágenes como Adobe®Photoshop; este software permite determinar la distribución del color en el alimento, en coordenadas colorimétricas CIE L\*a\*b\* o en otros modelos de color como el RGB, CMYK, entre otros (Pereira et al 2012).

Las técnicas para el procesamiento y análisis de imágenes mediante el uso del SVC se categorizan principalmente en 3 niveles:

1. Bajo nivel de procesamiento: se refiere a la adquisición y el pre-procesamiento de la imagen. La adquisición hace referencia a la captura de la imagen por medio de la cámara digital, mientras que en el pre- procesamiento la imagen capturada es modificada para mejorar la calidad de esta (eliminación de bordes transformación de la imagen a otro formato, etc.).
2. Nivel intermedio de procesamiento: involucra la segmentación de la imagen, su representación y descripción. Durante la segmentación se diferencia el objeto del fondo para determinar el área en la cual se determinará el color.
3. Alto nivel de procesamiento, que concierne al reconocimiento e interpretación, es decir al análisis de las coordenadas colorimétricas (Pereira & León, 2012).



**Figura 10:** Sistema de visión computarizada (SVC)  
**Fuente:** Adaptada de Pereira, 2009

Existen varios autores que han determinado el color de la carne usando el SVC, como *Lu et al. (2000)* y *Girolami et al. (2013)*, estos últimos, evaluaron el color de la carne de res, cerdo y pollo mediante colorímetro y el sistema de visión computarizada para comparar las similitudes así como las diferencias que existen entre estos dos métodos. De los resultados que obtuvieron concluyeron que el sistema de visión computarizada es un método viable para determinar el color, ya que reproduce un color muy similar al real, mientras que el uso del colorímetro no genera las coordenadas correspondientes del verdadero color de las carnes que analizaron.

Indistintamente del método que se utilice para determinar el color, se debe considerar que existen varios factores que afectan la percepción de este y se pueden clasificar como **a)** intrínsecos y **b)** extrínsecos. Los factores intrínsecos son las características físicas, químicas y bioquímicas propias del alimento, mientras que los factores extrínsecos son externos a la naturaleza de los alimentos, y tienen que ver con las características del medio como la luz, el entorno, etc. (*Artigas, Capilla & Pujol, 2002*).

Además autores como *Girolami et al. (2013)* y *Pereira, (2009)* consideran que el SVC puede ser un método prometedor para la predicción de color en la industria de los alimentos, ya que es un método no invasivo, es decir, que no se necesita homogeneizar la muestra para llevar a cabo la determinación, ya que permite capturar y describir el color de un alimento entero y comparado con otros instrumentos para la medición de color su costo económico es menor.

## 1.6 Deshidratación osmótica

Una de las principales causas de pérdida y deterioro de los alimentos es la cantidad de agua libre presente en ellos. A expensas de este elemento vital, muchos microorganismos proliferan acelerando el deterioro o podredumbre de los alimentos causando importantes pérdidas económicas en la industria alimentaria, por consiguiente, se hace necesario el desarrollo de tecnologías simples y de bajo costo para preservar y dar valor agregado a tales productos.

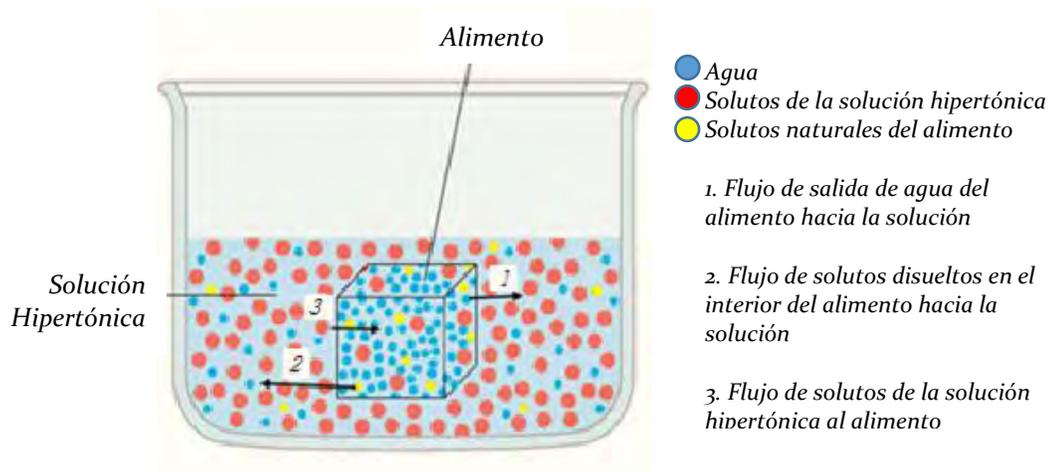
La deshidratación es un método para la conservación de alimentos y es una de las alternativas para la solución de los problemas anteriormente mencionados; puede hacerse mediante distintos métodos: solar, secado por aire caliente, liofilización, secado por microondas, entre otros. No obstante todos tienen el mismo propósito, la disminución de la cantidad de agua en el alimento. Sin embargo algunos de estos métodos tradicionales de deshidratación afectan la calidad de los alimentos. Por ejemplo, el secado por aire caliente puede provocar oscurecimiento en los productos y disminuir su valor nutricional, por efecto de las altas temperaturas que se utilizan durante dicho proceso. Otro ejemplo es la liofilización, proceso poco viable ya que los equipos que se utilizan son muy costosos y consumen mucha energía. Sin embargo, dentro de este abanico de métodos de deshidratación, se encuentra el proceso de deshidratación osmótica (DO) (Apaza & Apaza, 2010), proceso que ha llamado la atención debido a su bajo requerimiento de energía y temperatura en comparación con otros métodos como es el secado por aire. Esta eficiencia energética que ofrece el tratamiento osmótico se debe a que es un tratamiento no térmico, ya que el agua contenida en el alimento no pasa por un cambio de fase para poder ser retirada de éste (Falade, Igbeka & Ayanwuyi, 2007). Sin embargo, con este proceso solo es posible lograr una deshidratación parcial del alimento; por lo tanto, generalmente es utilizado como un pre tratamiento, ya que el contenido de humedad que se consigue con este proceso no es tan bajo como para que el producto terminado pueda ser considerado comercialmente estable. Otras funciones de la deshidratación osmótica es mejorar la calidad del producto en términos de color, sabor y textura, y modificar la estructura del tejido de un alimento, de tal manera que disminuya el tiempo del siguiente proceso como el secado por aire, congelación, entre otros (Fernandes & Rodrigues, 2008).

El proceso de deshidratación osmótica básicamente consiste, en la inmersión de un alimento en una solución hipertónica (alta concentración de solutos y baja actividad de agua) para eliminar parte del agua del alimento. La fuerza impulsora para la eliminación del agua es la diferencia de presión osmótica que existe entre el alimento y la solución hipertónica (Fernandes et al., 2009).

Durante el proceso de deshidratación se genera el fenómeno físico conocido como ósmosis, en el cual se produce un desplazamiento de agua a través de una membrana semipermeable, inducida por una diferencia de concentraciones de solutos, desde una zona de alta concentración de moléculas de solvente y baja concentración de moléculas de soluto (hipotónica), hacia una zona de baja concentración de moléculas de solvente y alta concentración de moléculas de soluto (hipertónica), por acción de las diferencias de presión osmótica que poseen estas soluciones. El proceso finaliza cuando se igualan las presiones osmóticas (*Tortora, Funke & Case, 2007*). Como se mencionó anteriormente, los alimentos contienen una gran cantidad de agua y de sustancias disueltas en el interior de las células que conforman los tejidos. La membrana celular actúa como membrana semipermeable, el contenido intracelular como solución hipotónica y como solución hipertónica se utiliza una solución preparada con altas concentraciones de soluto (agente osmótico), el cual se elige en función del alimento a tratar; para la elaboración de productos a base de carne generalmente se utiliza el cloruro de sodio, cloruro de potasio u otras sales (*Apaza & Apaza, 2010, Xiong, 2005*). Si la membrana celular fuera perfectamente semipermeable, los solutos no podrían difundirse hasta el interior de las células; no obstante los alimentos no poseen este tipo de membrana, por lo cual puede existir el fenómeno de osmosis (*Derossi et al., 2007*).

Durante el proceso de deshidratación osmótica se producen dos flujos de transferencia de masa a contracorriente (*figura 11*):

1. Difusión de agua desde el alimento a la solución cuya fuerza impulsora es la diferencia de presión osmótica. Durante la extracción del agua existe un flujo de solutos naturales provenientes del alimento hacia la solución tales como ácidos orgánicos, minerales, sales, pigmentos entre otros, que son cuantitativamente insignificantes, sin embargo son importantes para el valor nutricional y para las características sensoriales del alimento.
2. Difusión de solutos desde la solución hacia el alimento, denominado como impregnación, donde la fuerza impulsora es la diferencia de concentraciones (*Falade, Igbeka & Ayanwuyi, 2007*).



**Figura 11:** Diagrama de los fenómenos de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica  
**Fuente:** Elaborada a partir de información de Apaza & Apaza, 2010

### 1.6.1 Deshidratación osmótica en productos cárnicos

Históricamente la deshidratación osmótica es de los métodos más antiguos para la conservación de la carne y que coloquialmente es conocido como salazón. Sin embargo hoy en día no deber ser considerado un proceso sencillo, si no que representa una verdadera transformación de la carne, ya que con este proceso se consigue la estabilización de la materia prima y permite el desarrollo de las características específicas de los productos deshidratados por este método (Armeling, 2001).

La NOM-213-SSA1.2002 menciona que el proceso de salazón es la conservación de carne mediante la adición de sales generalmente cloruro de sodio. Existen dos métodos para el salado: salazón seca y humedad; en la primera el alimento se cubre con una capa de sal, mientras que en la segunda se realiza la inmersión de la carne en una disolución de agua con sal, la cual es conocida como salmuera (solución hipertónica).

El cloruro de sodio (NaCl) es un agente osmótico que juega un papel importante durante la deshidratación, aunque su principal función es la de conservar y añadir sabor, la penetración de la sal en la carne trae como consecuencia fenómenos fisicoquímicos y bioquímicos que afectan los componentes de la carne, modificando su textura, sabor, aroma y color (Aliño et al., 2010). La concentración de sal en la salmuera es un variable muy importante ya que afecta la transferencia de masa que ocurre durante el proceso de deshidratación, puesto que influye en la dirección de transporte del agua, así como en el estado de equilibrio. Un bajo contenido de NaCl aumenta la capacidad de retención de agua (CRA), fenómeno que es conocido como

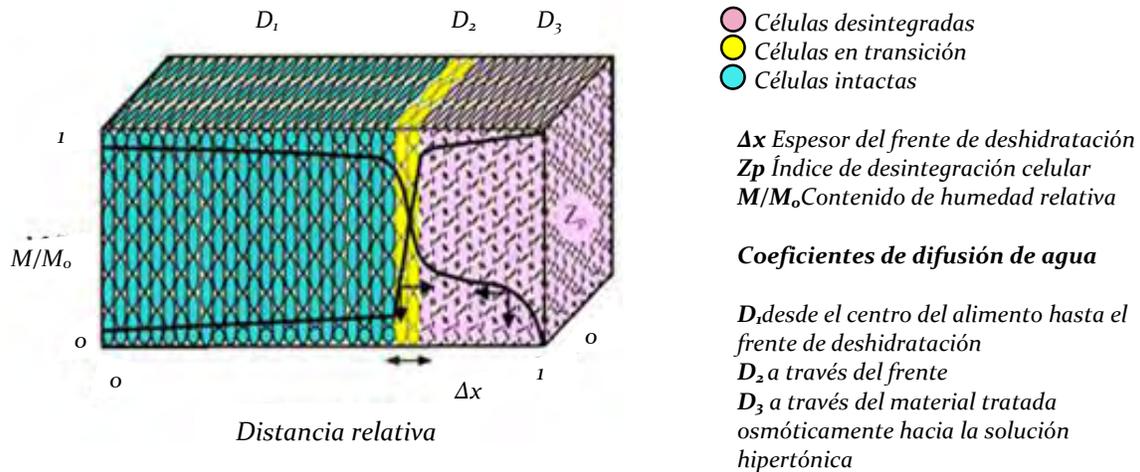
“salting-in” y que está vinculado con la modificación de las cargas electrostáticas en la red de proteínas. Sin embargo un alto contenido de NaCl podría llevar a una disminución de la CRA, fenómeno que probablemente se debe a la insolubilización de las proteínas y que es conocido como “salting-out” (Ozuna *et al.*, 2013).

### 1.7 Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica

Precedentemente se mencionó que la deshidratación osmótica es un proceso complejo de contra-difusión simultáneo de agua y solutos. Este proceso se caracteriza por tener periodos dinámicos y periodos de equilibrio. En el periodo dinámico, las velocidades de transferencia de masa varían hasta alcanzar el equilibrio donde la tasa neta de transporte de masa es cero (Martínez & Aponte, 2005). Por lo general la mayor tasa de transferencia de agua, desde el alimento hacia la solución, ocurre durante las dos primeras horas de inmersión (Rastogi *et al.*, 2002).

La eliminación de agua de un alimento generalmente se da por difusión. La difusión de agua u otros fluidos o gases a través de sistemas no biológicos homogéneos es fácil de describir, sin embargo la complejidad se da cuando el medio en el que el agua se difunde es heterogéneo y presenta cambios durante el desarrollo de la difusión. Los alimentos al ser sistemas biológicos heterogéneos ocasionan que la difusión y la velocidad de deshidratación varíen, por lo tanto se puede decir que la transferencia de masa no es igual para todos, ya que depende de la estructura tisular del alimento así como como los parámetros del proceso (Apaza & Apaza, 2010; Rocca, 2010).

La comprensión del proceso de deshidratación osmótica es muy importante, ya que durante el proceso ocurren ciertos cambios estructurales en el alimento. La causa más probable de daño estructural se puede atribuir a la contracción celular causada por la pérdida de agua durante el tratamiento (Derossi *et al.*, 2007). Sin embargo Rastogi *et al.* (2002) desarrollaron un modelo (Figura 12) que describe los cambios que ocurren en un sistema alimentario durante la deshidratación osmótica, en donde se propone que la deshidratación del alimento ocurre desde la superficie del alimento (frente de deshidratación  $\Delta x$ ) que está en contacto con la solución osmótica, hacia el centro del alimento. Esto da como resultado la desintegración celular en la región deshidratada y el agua extraída es transportada a través de tres regiones diferentes (cada región con características propias y distintas): la difusión de agua desde el centro del alimento hacia el frente de deshidratación, difusión de agua a través del frente, y finalmente difusión de agua a través de las capas deshidratadas hacia la solución hipertónica.



**Figura 12:** Mecanismo de deshidratación osmótica en un material biológico  
 Fuente: Apaza & Apaza, 2010.

Al principio, la difusión de agua ocurre desde la capa más externa del alimento hacia la solución hipertónica, ocasionando el aumento de la presión osmótica en la superficie, lo cual tiende hacia un valor crítico. Una vez alcanzado este valor crítico, la membrana celular se rompe y la célula se encoge. Como consecuencia, hay una reducción desmesurada en la proporción de las células intactas, lo cual se ve reflejado en un incremento del índice de permeabilización  $Z_p$ , ver (figura 12). En otras palabras,  $Z_p$  es un parámetro integral que indica la reducción relativa de células intactas y el coeficiente de difusión en esta zona del alimento es denotado por  $D_3$ . La característica principal de este frente es que el proceso de deshidratación que se da ahí es muy rápido debido a la presión osmótica ejercida por la concentración de la solución hipertónica. Al proseguir con la deshidratación osmótica, el frente de deshidratación  $\Delta x$  continúa desplazándose hacia el centro del alimento y entre estas dos regiones se encuentran unas células en proceso de desintegración (en transición) y una gran cantidad de agua se difunde hacia la superficie del alimento, este coeficiente de difusión en esta región esta denominado por  $D_2$ . Mientras que en la región central del alimento las células del tejido se encuentran intactas, el coeficiente de difusión de agua en el centro ( $D_1$ ) es mucho menor que  $D_2$  y  $D_3$ . En la figura también están representados los perfiles del índice de desintegración celular ( $Z_p$ ) y el contenido relativo de humedad del producto ( $M/M_0$ ). Este modelo es quizá el mejor planteamiento del mecanismo de deshidratación osmótica a nivel celular en medios heterogéneos como son los alimentos (Rastogi et al., 2002).

**1.7.1. Parámetros osmóticos y modelo cinético de Azuara.**

Para modelar el proceso osmótico, es necesario entender los mecanismos de transferencia de masa involucrados en el sistema y desarrollar los modelos teóricos para la determinación de los parámetros de proceso. La cinética de DO está determinada por la aproximación al equilibrio y por las velocidades de pérdida de agua ( $WL$ ), ganancia de sólidos ( $SG$ ) y la pérdida de peso del alimento ( $WR$ ), también conocidos como parámetros osmóticos (*Sharma, Mulvaney & Rizvi, 2003; Martínez & Aponte, 2005*).

Los parámetros osmóticos pueden determinarse mediante las ecuaciones 1 a 3 (*Rodrigues & Fernandes 2007*):

$$WL (\%) = \frac{(w_i \cdot X_i - w_f \cdot X_f)}{w_i} \cdot 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

$$SG (\%) = \frac{[w_f \cdot (1 - X_f) - w_i \cdot (1 - X_i)]}{w_i} \cdot 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

$$WR (\%) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \cdot 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

- $w_i$     Masa inicial de la muestra (g)
- $w_f$     Masa final de la muestra (g)
- $X_i$     Fracción de agua inicial de la muestra
- $X_f$     Fracción de agua final de la muestra

Las ecuaciones anteriores consideran que la cantidad de sólidos que salen del alimento, es insignificante, y de este modo, la muestra solamente pierde agua y gana solutos.

Existen varios modelos matemáticos para obtener los coeficientes de difusión de agua y sólidos, uno de ellos es el modelo cinético de *Azuara et al. (1992)* quienes han encontrado una ecuación de dos parámetros basada en balances de masa; con esta ecuación se puede predecir la cinética de deshidratación osmótica, sin necesidad de llegar al equilibrio experimental, usando tan solamente un corto periodo de proceso.

Balance de masa el agua en el interior del alimento es:

$$WL_{exp} = WL_{\infty} - WS \quad Ec. 4$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Fracción de agua} \\ \text{perdida} \\ \text{por el alimento en} \\ \text{el tiempo } t \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Fracción de agua perdida} \\ \text{del} \\ \text{alimento cuando} \\ \text{se alcanza el equilibrio} \\ t = \infty \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Fracción de agua que se puede} \\ \text{difundir a la solución osmotica,} \\ \text{pero que aun permance} \\ \text{en el inteior del alimento} \\ \text{en el tiempo } t \end{array} \right]$$

En la ecuación 4 el valor de  $WL_{\infty}$  está fijado para determinadas condiciones de temperatura y concentración. La pérdida de agua  $WL_{exp}$  se puede determinar a partir de la ecuación 1.

Por otro lado, el valor de  $WS$  decrece cuando incrementa la velocidad de pérdida de agua y el tiempo, sugiriendo una relación entre  $WL$  y  $WS$ , representada por el valor  $K$ . Este parámetro a su vez, es una función del tiempo y de la velocidad de pérdida de agua.

$$WS = \frac{WL}{K} \quad Ec. 5$$

La velocidad de pérdida de agua es función del tiempo, la temperatura y de la concentración inicial de la solución hipertónica. Dado que la mayoría de los experimentos de deshidratación osmótica se llevan a cabo a una concentración inicial y a temperatura constante, se asume que la velocidad de pérdida de agua esta únicamente en función del tiempo. Basado en esto, se propone una función para  $K$  en términos de  $(t)$  y una constante  $(S_i)$  relacionada con la pérdida de agua:

$$K = S_1 t \quad \text{Ec. 6}$$

Sustituyendo la ecuación 6 y 4 en la ecuación 5, y reordenando los términos, tenemos una ecuación que asocia la pérdida de agua ( $WL$ ) con el tiempo ( $t$ ):

$$WL = \frac{S_1 t (WL_\infty^{mod})}{1 + S_1 t} \quad \text{Ec. 7}$$

Cuando  $t \rightarrow \infty$  la ecuación 7 llegar a ser asintótica en el valor correspondiente a  $WL_\infty$ .

Para poder predecir la fracción de agua pérdida por el alimento ( $WL$ ) al tiempo  $t$  en la ecuación, es necesario calcular el valor para  $S_1$  y  $WL_\infty$ . Estos pueden ser calculados por una regresión lineal usando datos experimentales de  $WL$  obtenidos durante un corto periodo de tiempo. La forma lineal de la ecuación 7:

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{S_1 (WL_\infty)} + \frac{1}{WL_\infty^{mod}} \quad \text{Ec. 8}$$

Haciendo un tratamiento similar al de las ecuaciones 7 y 8, se obtiene las ecuaciones para la ganancia de sólidos en el alimento:

$$SG = \frac{S_2 t (SG_\infty^{mod})}{1 + S_2 t} \quad \text{Ec. 9}$$

Forma lineal:

$$\frac{t}{SG} = \frac{1}{S_2 (SG_\infty)} + \frac{1}{SG_\infty^{mod}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- $SG$  Fracción de sólidos ganados por el alimento en el tiempo  $t$
- $SG_{\infty}$  Fracción de sólidos ganados por el alimento cuando se alcanza el equilibrio
- $S_2$  Constante de velocidad relativa de ganancia de sólidos

### 1.7.2. Determinación de los coeficientes de difusión efectivos de agua y sólidos para una geometría cubica

*Azuara et al. (1992)* también proponen calcular el coeficiente de difusión efectivo relacionando su modelo con la segunda ley de Fick. Los modelos de Crank son los más conocidos para representar el mecanismo difusional, que consisten en un grupo de soluciones de la ley de difusión de Fick para diferentes geometrías (láminas planas, cilindros, cubos y esferas); con estos modelos se estima la difusividad efectiva ( $D_{ef}$ ) del agua ( $D_{ew}$ ) y de solutos ( $D_{es}$ ) mediante la resolución de ecuaciones analíticas.

El modelo de difusión de Fick tiene las siguientes consideraciones:

1. Se asume que la solución osmótica es un medio semi-infinito, por lo tanto se requiere una relación disolución/ alimento muy grande.
2. Aunque tiene en cuenta la forma y las dimensiones, sólo hay soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas.
3. Se asume que solo se presenta el mecanismo de difusión para la extracción de agua.
4. No hay efecto de los sólidos ganados ni de los solutos perdidos sobre la pérdida de agua
5. Se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa.
6. Se desprecia la resistencia a la transferencia de masa externa. (*Martínez & Aponte, 2005*).

La solución de la segunda Ley de Fick para la difusión unidireccional y en estado no estacionario está dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- $C$  Es la concentración (Kg/m<sup>3</sup>)
- $D$  Coeficiente de difusión efectivo (m<sup>2</sup>/s)
- $x$  La coordenada según la cual se produce la difusión
- $t$  Tiempo (s)

De acuerdo con *Rastogi et al. (2002)* las soluciones para la ecuación 11 para la difusión en un cubo son:

Difusión de agua:

$$Mr = \frac{(m_t - m_\infty)}{(m_0 - m_\infty)} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n^3 \exp \left[ -D_{ew} t q_n^2 \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right) \right] \quad \text{Ec. 12}$$

Difusión de sólidos:

$$Sr = \frac{(S_t - S_\infty)}{(S_0 - S_\infty)} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n^3 \exp \left[ -D_{es} t q_n^2 \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right) \right] \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

- $Mr$  Concentración de agua
- $Sr$  Concentración de sólidos
- $M_0$  y  $S_0$  Concentración de agua y sólidos inicial (g/g de muestras)
- $M_\infty$  y  $S_\infty$  Concentración de agua y sólidos en el equilibrio (g/g de muestras)
- $M_t$  y  $S_t$  Concentración de agua y sólidos en cualquier momento del proceso
- $D_{ew}$  Difusividad de agua (m<sup>2</sup>/s)
- $D_{es}$  Difusividad de sólidos (m<sup>2</sup>/s)

a.b.c Dimensiones de la muestra (m)

Los coeficientes  $C_n$  son comunes en ambas ecuaciones y están dados por:

$$C_n = \frac{2 \alpha (1+\alpha)}{(1+\alpha + \alpha^2 q_n^2)} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde  $\alpha$  es la relación entre el volumen de solución y el volumen del cubo y los coeficientes  $q_n$  son las raíces positivas distintas a cero de la siguiente ecuación:

$$\tan q_n = -\alpha q_n \quad \text{Ec. 15}$$

Para la determinación del número de Fourier para la difusión de agua:

$$F_{ow} = \frac{D_{ew}t}{A^2} \quad \text{Ec. 16}$$

para la difusión de sólidos:

$$F_{os} = \frac{D_{es}t}{A^2} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

$$\frac{1}{A^2} = \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \quad \text{Ec. 18}$$

En el caso de una geometría cúbica cuando el número de Fourier para la difusión de agua  $F_{ow} = \frac{3D_{ew}t}{a^2}$  o para la difusión de sólidos  $F_{os} = \frac{3D_{es}t}{a^2}$  es mayor que 0.1 solamente el

primer término de la serie en las ecuaciones 12 y 13 es significativo y los demás términos pueden despreciarse, de modo que aplicando logaritmos naturales a las ecuaciones para linealizarlas, las mismas se reducen a las siguientes:

$$\ln \left[ \frac{m_t - m_\infty}{m_o - m_\infty} \right] = 3 \ln C_1 - D_{ew} q_1^2 \frac{3}{a^2} t \quad \text{Ec. 19}$$

$$\ln \left[ \frac{S_t - S_\infty}{S_o - S_\infty} \right] = 3 \ln C_1 - D_{es} q_1^2 \frac{3}{a^2} t \quad \text{Ec. 20}$$

Si se grafican los miembros de la izquierda, de estas ecuaciones vs el tiempo de deshidratación empleando los datos experimentales, se obtiene aproximadamente una recta, cuya pendiente y ordenada al origen correspondientes a las ecuaciones anteriores son las siguientes:

Pendiente ecuación 19 : Ec. 21

$$-D_{ew} q_1^2 \frac{3}{a^2}$$

Pendiente ecuación 20 : Ec. 22

$$-D_{es} q_1^2 \frac{3}{a^2}$$

Para las dos ecuaciones, las ordenadas al origen son las mismas:

Ordenada al origen:

$$3 \ln C_1 \quad \text{Ec. 23}$$

Los valores de  $D_{ew}$  y  $D_{es}$  pueden determinarse a partir de las pendientes de las rectas. Es importante mencionar que  $D_e$  es un parámetro cinético el cual depende fuertemente de las condiciones experimentales, del tipo de alimento utilizado y del método matemático utilizado (Martínez & Aponte, 2005).

### **1.7.3. Factores que influyen en la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica.**

La eficiencia de un proceso de deshidratación osmótica está relacionada con la velocidad y la tasa de transferencia de masa. Como se mencionó anteriormente, la transferencia de masa depende de diferentes factores, dentro de estos se encuentran:

- **Estructura del alimento:** La variabilidad que existe en la tasa de transferencia de masa entre los alimentos (frutas, vegetales, carne) está relacionada principalmente con su estructura, la compactación del tejido, el contenido inicial de sólidos solubles e insolubles, espacios intracelulares, presencia de gas, etc. Por ejemplo la compactación está directamente relacionada con la densidad aparente de los alimentos y ésta, a su vez, tiene que ver con la porosidad; en algunos estudios se ha demostrado que una mayor porosidad del tejido, aumenta la velocidad de transferencia de masa (Chavan & Amarowicz, 2012). En el caso de la carne su compleja estructura conformada por varios tejidos, grasa intramuscular (marmoleado), etc. dificulta la difusión de la solución hipertónica (Cárcel et al., 2007).
- **Tamaño y forma del alimento:** Cuanto mayor es el área superficial con respecto al volumen, mayor será el área de contacto con la solución osmótica, por consiguiente mayor será la velocidad de deshidratación (Hui et al., 2008).
- **Temperatura de proceso:** Los procesos de DO que se llevan a cabo a mayores temperaturas generalmente promueven una pérdida de agua mucho más rápida que los elaborados a bajas temperaturas, esto se debe a que la temperatura disminuye la viscosidad de la solución osmótica y ello promueve que ésta fluya con menos dificultad dentro de la heterogénea conformación del tejido alimentario. Sin embargo, la aplicación de temperaturas por encima de 60°C pueden inducir a daños contra la integridad del tejido alimentario. Además, el uso de altas temperaturas puede causar pardeamiento interno y ocasionar pérdida de compuestos termolábiles (vitaminas, compuestos aromáticos, entre otros). Generalmente la deshidratación osmótica se lleva a cabo a temperatura ambiente (25 a 40 °C) por lo tanto es considerado un tratamiento no térmico (Hui et al., 2008).

- **Tiempo de inmersión:** La pérdida de agua y ganancia de sólidos es mayor durante las primeras horas de proceso, luego disminuye drásticamente como consecuencia de la progresiva disminución de la presión osmótica. El tiempo de proceso también está en función de las condiciones de deshidratación y de las características del alimento (*Chavan & Amarowicz, 2012*).
- **Relación solución-alimento:** Expresa la cantidad de solución requerida por unidad de peso del alimento a procesar. Este factor es importante en el proceso, cuando se sumerge el alimento en la solución hipertónica, éste va perdiendo agua de manera progresiva y a una velocidad directamente proporcional al nivel de concentración de la solución. Por lo tanto, el agua eliminada va diluyendo la solución osmótica a la misma velocidad con que fluye desde el alimento, esto provoca un descenso en la presión osmótica y, a causa de ello el proceso de DO se prolonga, creando pérdidas en la productividad y rentabilidad del proceso. Una forma de mantener constante la concentración de la solución osmótica, es utilizando relaciones altas de solución:alimento del orden de 1:10 a 1:60 (*Chavan & Amarowicz, 2012*). Cuánto mayor sea la relación masa de solución respecto a la masa del alimento mayor será la pérdida de agua y ganancia de solutos (*Sutar & Sutar, 2013*).
- **Agitación:** Es una operación física que hace a la solución osmótica más uniforme, eliminando gradientes de concentración, temperatura y otras propiedades. Se ha demostrado que con la agitación se obtienen valores mucho mayores de pérdida de agua, por lo que la agitación influye en la pérdida de peso del producto (*Chavan & Amarowicz, 2012*).
- **Tipo de agente osmótico:** Las propiedades fisicoquímicas del soluto elegido son una variable determinante en la transferencia de masa. Si se utilizan solutos de peso molecular alto se favorece la pérdida de agua, mientras que si se eligen solutos cuyo peso molecular es bajo la impregnación de solutos al alimento será mayor, ya que las moléculas pueden difundirse con mayor facilidad hacia el interior del alimento. Por lo tanto la elección del soluto osmótico es importante, puesto que la calidad organoléptica del producto final es considerada como uno de los factores más importantes. Otros criterios a tomar en cuenta son: el costo del soluto, el grado con que deprime la actividad de agua y el grado de solubilidad del soluto en agua. Entre los solutos más utilizados, debido a su disponibilidad y bajo costo, se encuentran la sal y azúcar (*Hui et al., 2008*).
- **Concentración de la solución osmótica:** Cuanto mayor sea la concentración de soluto en la solución osmótica mayor será la diferencia de presión osmótica

entre ésta y el producto, lo cual aumentará la velocidad de pérdida de agua. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que utilizar concentraciones muy altas de soluto puede causar que se forme una capa de éste sobre la superficie del alimento, lo que dificultará la pérdida de agua (Sutar & Sutar, 2013).

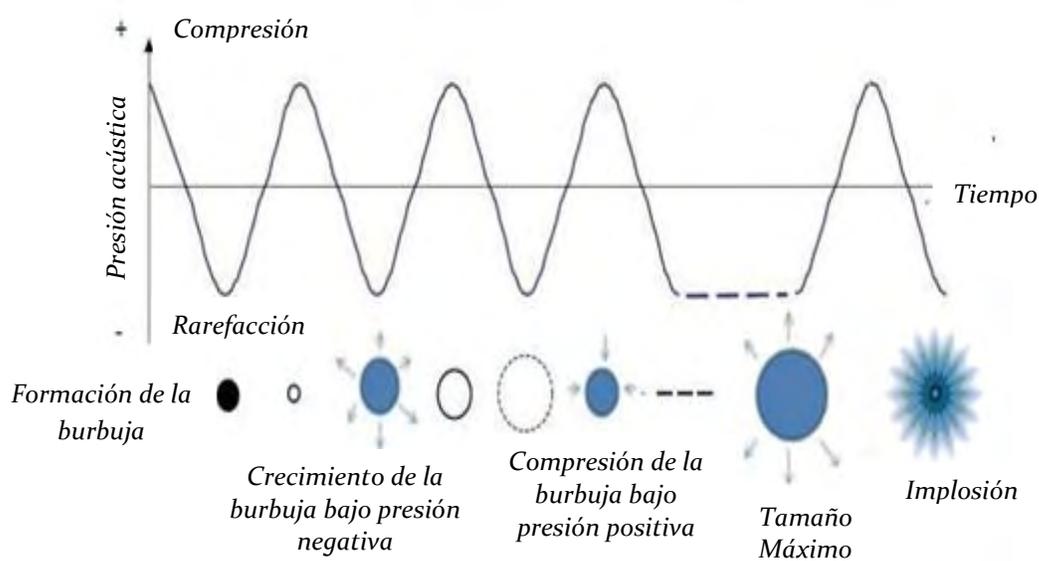
- **Pretratamientos:** Generalmente son utilizados para reducir el contenido inicial de agua o para modificar la estructura del tejido del alimento, de tal manera que contribuyan a disminuir el tiempo de proceso del siguiente tratamiento (Fernandes & Rodrigues, 2008). Existen diferentes tecnologías que habitualmente son utilizadas como pretratamiento, aunque también pueden ser empleadas de manera simultánea durante el proceso de deshidratación osmótica y así mejorar la transferencia de masa. Dentro de estas tecnologías se encuentra el uso de: agitación mecánica, fuerza centrífuga, pulsos eléctricos, radiación gamma, calentamiento por microondas, aplicación de vacío y ultrasonido (Sutar & Sutar, 2013).

## 1.8 Ultrasonido

El ultrasonido (US) es un método no térmico, que puede definirse como vibraciones mecánicas (ondas ultrasónicas) que pueden viajar en un medio sólido o líquido a una frecuencia superior a la frecuencia máxima audible para el oído humano (16-18 KHz). La aplicación del ultrasonido en la industria de los alimentos puede dividirse en dos categorías: de alta y baja intensidad. El uso de ultrasonido de baja intensidad involucra el uso de frecuencias altas (2-10 MHz), este tipo de ondas no causan daño físico ni químico en las propiedades del alimento a tratar (ondas no invasivas), mientras que el ultrasonido a alta intensidad usa frecuencias bajas que van de 20 a 100 KHz, este tipo de ondas sí causan daño estructural al alimento (Jayasooriya et al., 2004). A alta intensidad, las ondas ultrasónicas generan una mayor presión, cizallamiento y gradientes de temperatura en los alimentos, que ocasionan un daño en la estructura del tejido (McClements, 1995).

El ultrasonido de alta intensidad está asociado con el fenómeno de cavitación, que es la formación y evolución de micro burbujas en un medio líquido (Cárcel et al., 2007). Cuando una onda ultrasónica de alta frecuencia se propaga través de un líquido, sus moléculas se ven sujetas a presiones positivas (compresión) y negativas (rarefacción). Durante la fase de rarefacción si la presión negativa, es lo suficientemente grande se puede formar una burbuja en el líquido. El resultado es la formación interrumpida de micro burbujas cuyo tamaño aumenta miles de veces (expansión). Las micro burbujas que alcanzan un tamaño crítico colapsan (implosión) violentamente para volver al

tamaño original (figura 13). El colapso supone la liberación de toda la energía acumulada (micro jets) ocasionando incrementos de temperatura instantáneos y focales, que se disipan sin que supongan una elevación sustancial de la temperatura del líquido tratado. Sin embargo, la energía liberada, así como el choque mecánico asociadas al fenómeno de implosión, afectan la estructura de las células situadas en el micro entorno (Rahman, 2007). Las ondas ultrasónicas también pueden causar una serie de rápidas compresiones y expansiones, de manera similar al comportamiento de una esponja cuando se exprime y se suelta en repetidas ocasiones (efecto esponja) (Fernandes, Gallao & Rodrigues, 2009). El efecto esponja causado por la aplicación del ultrasonido es responsable de la creación de canales microscópicos, provocando una deformación en la estructura del alimento que ayuda al aumento de transferencia de masa (Fernandes, Oliveira & Rodrigues, 2007).

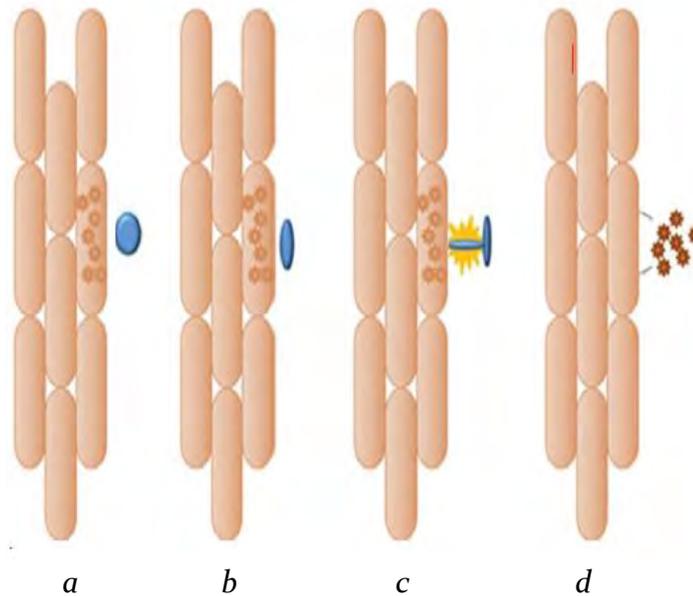


**Figura 13:** Cavitación: generación y evolución de micro burbujas en un medio líquido  
**Fuente:** Adaptada de <http://www.ctgclean.com/blog/technology-library/articles/ultrasonic-cleaning->

### 1.8.1. Efectos del ultrasonido en la carne

El ultrasonido es una tecnología emergente viable para el tratamiento de alimentos y que recientemente se ha utilizado como pretratamiento o de manera simultánea para aumentar la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica. Los efectos de las ondas ultrasónicas de alta intensidad sobre las propiedades físicas, bioquímicas y microbianas de la carne han sido objeto de gran interés en los últimos años (Awad et al., 2012; Chwastek, 2014; Rastogi et al., 2002).

Jayasooriya *et al.*, 2007 mencionan que la aplicación de ultrasonido de alta intensidad en carne tiene la capacidad de alterar los componentes celulares y subcelulares. Estos cambios se deben principalmente al fenómeno de cavitación, como se observa en la *figura 14*; esto es posible ya que cuando una burbuja se encuentra cerca de la superficie sólida (alimento) (a), y colapsa durante el procesos de compresión (b) se producen micro-jets (chorros de agua) que chocan directamente con la superficie del alimento, estos provocan la ruptura de las células del tejido, (c) y (d) (Chemat, Zill-e-Human & Khan, 2011).



**Figura 14:** Colapso de una burbuja en una superficie sólida  
**Referencia:** Chemat, Zill-e-Human & Khan *et al.*, 2011

Además de los efectos causados por el fenómeno de cavitación, existen otras alteraciones que ocurren antes de la implosión de las burbujas. Durante la aplicación del ultrasonido también se generan vibraciones violentas, estas provocan el estiramiento y torsión de las membranas celulares causando su ablandamiento y posteriormente ocurre la ruptura por el efecto de la cavitación. Estos daños que se generan en las células traen como consecuencia la extracción de proteínas, minerales y otros componentes, que pueden afectar las propiedades nutritivas y organolépticas de la carne (Jayasooriya *et al.*, 2004).

Por otra parte autores como Chemat, Zill-e-Human & Khan (2011) y Mason, Paniwnyk & Lorimer (1996) han demostrado que la aplicación de ultrasonido durante la deshidratación osmótica provoca una deshidratación más uniforme del alimento, acorta el tiempo de proceso y reduce la formación de una corteza de soluto en la

superficie del alimento. También la exposición prolongada de ondas ultrasónica de alta intensidad en alimentos como la carne, facilita la liberación de proteínas miofibrilares, por lo tanto, el ultrasonido puede contribuir a mejorar las propiedades físicas de los productos cárnicos, como la capacidad de retención de agua, la textura, entre otros. Es importante mencionar que todos estos efectos anteriormente mencionados dependerán de la intensidad del ultrasonido, así como del tiempo de aplicación (McClements, 1995; Ozuna et al., 2013).

# Capítulo 2

## Metodología experimental

### Objetivos

- **Objetivo general:**

Evaluar la transferencia de masa y los cambios de color que ocurren durante el proceso de deshidratación osmótica de carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) con y sin ultrasonido.

- **Objetivos particulares:**

- 1) Evaluar la influencia del ultrasonido en el proceso de deshidratación osmótica de carne de cerdo (*Longissimus dorsi*), sobre los cambios en los parámetros osmóticos y en la transferencia de masa a partir de las cinéticas de cambio de humedad y sólidos en la carne.
- 2) Evaluar los cambios de color que ocurren en la carne de cerdo durante la deshidratación osmótica asistida con y sin ultrasonido mediante el sistema de visión computarizada para establecer su relación con la transferencia de masa que ocurre durante el proceso.

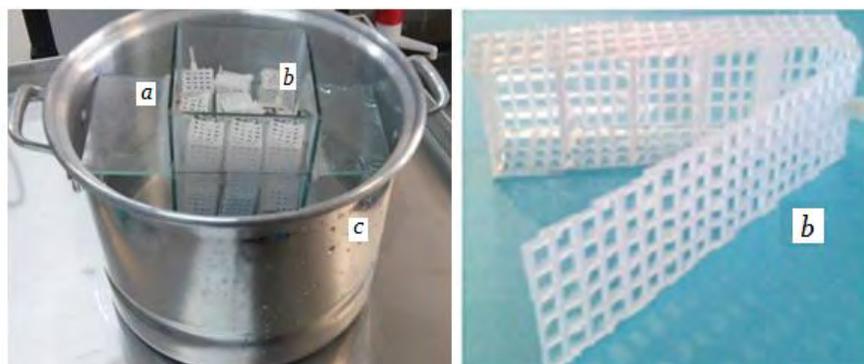
Este trabajo se llevó a cabo en el laboratorio 13 de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (Campo 4), Universidad Nacional Autónoma de México. Esta investigación fue desarrollada tomando como referencia la siguiente metodología experimental.

## 2.1 Actividades preliminares

Para las actividades preliminares se adaptó un sistema de deshidratación con y sin sonicación. También se estableció el método para la determinación de los parámetros de perfil color en las muestras mediante el sistema de visión computarizada.

### 2.1.1 Sistema de deshidratación osmótica con y sin sonicación

Para el sistema de deshidratación osmótica sin sonicación se elaboró una celda de vidrio con capacidad suficiente para contener todas las muestras que se utilizaron para la experimentación (*a*), en la que se introdujo la solución hipertónica y los porta muestras (*b*), estos últimos se construyeron con malla de plástico, cada uno con 5 compartimientos en los cuales se colocaron las muestras. Posteriormente la celda se colocó en el interior de un recipiente de aluminio (*c*) con hielos para mantener la temperatura de 10 °C y el montaje fue el siguiente (*Figura 15*):



*Figura 15: Montaje del sistema de DO sin sonicación*

El sistema de deshidratación osmótica con sonicación consistió en: *a*) Baño ultrasónico Cole-Palmer (Frecuencia de 40 kHz), *b*) Celda de vidrio *c*) Sistema de recirculación de agua y *d*) porta muestras. Para el montaje del sistema de deshidratación con sonicación, se colocó la celda de vidrio en el interior del baño ultrasónico y se instaló un sistema de recirculación de agua con hielos para mantener la temperatura de proceso a 10°C (*Figura 16*).

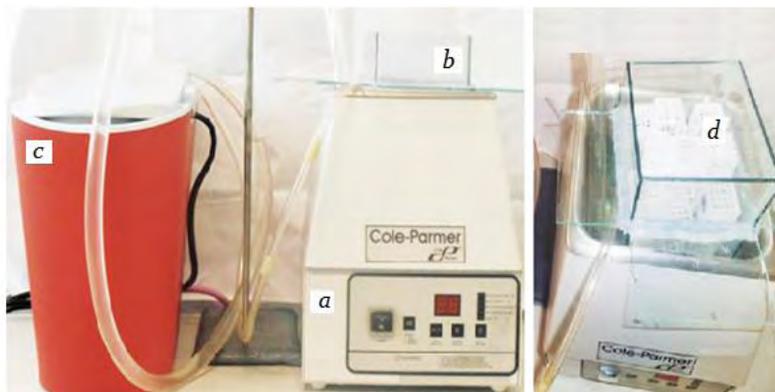


Figura 16: Montaje del sistema de DO con sonicación

### 2.1.2 Obtención de imágenes para la determinación de los parámetros de perfil de color

Para la obtención de imágenes se tomó como referencia las instalaciones sugeridas por Pereira (2009), Yam & Papadakis (2004) y Pereira et al. (2012). La instalación del sistema de visión computarizada (SVC) se desarrolló de forma que las condiciones propuestas por éstos autores se ajustaran a las condiciones de este trabajo y así impedir perturbaciones externas que afectaran la toma de las imágenes digitales.

El sistema de visión computarizada consistió en: a) Cámara fotográfica de alta resolución (Canon EOS Digital Rebel XS) de 10.1 megapíxeles con un macro lente ultrasónico EF-S de 60 mm 1:28 y control remoto, b) tripié para cámara, c) dos lámparas d) photobox y e) soporte para muestras.

Para el montaje del SVC (figura 17) se instaló sobre una mesa un photobox, el cual sirvió para no tener interferencia de otras luces externas. Dentro del photobox se dispuso el soporte con un fondo negro para evitar la reflexión de la luz, en el cual se montaron las muestras. El sistema de iluminación consistió en dos lámparas de escritorio con focos de luz incandescente (D65) y con reflectores, los cuales ayudan a enfocar la luz a un lugar en específico, las lámparas se situaron en los laterales del photobox. Para la captura de las imágenes la cámara se colocó en el tripié a una altura de 1.13m y a una distancia de 30 cm entre la muestra y la cámara.



- a) Cámara de alta resolución
- b) Tripié
- c) Lámparas con reflectores
- c) Photobox

Figura 17: Montaje del sistema de visión computarizada

Las condiciones que se ajustaron en la cámara para esta experimentación fueron:

- Velocidad de obturador: 6 segundos
- Valor de apertura: f/11
- Sensibilidad ISO: 100
- Distancia focal: 60 mm
- Sin zoom
- Sin flash

Una vez que se adquirieron las imágenes digitales se transfirieron a una computadora en donde se convirtieron a formato .TIFF para posteriormente ser analizadas en el software photoshop, de acuerdo a la metodología propuesta por Yam & Papadakis (2004).

## 2.2 Determinación de humedad

El contenido de humedad fue determinado por el método estipulado en la Norma Mexicana *NMX-F-544-1992 Método de prueba para la determinación de humedad en productos cárnicos*.

El contenido de agua en la muestra se calculó por diferencia de peso y se expresa en % de humedad (g de H<sub>2</sub>O/ 100 g de muestra):

$$\% \text{ Humedad} = \frac{CM - CMS}{PM} \times 100 \quad \text{Ec. 24}$$

Donde

*CM* Peso de la cápsula con muestra húmeda (g)

*CMS* Peso de la cápsula con muestra seca (g)

*PM* Peso de la muestra (g)

### 2.3 Determinación de sólidos solubles

Para la determinación de NaCl en las muestras de carne sometidas a DO se utilizó un refractómetro de salinidad ATC-S/Mill-E (Atago CO, LTD, Japón). La preparación de las muestras se llevó a cabo conforme al método propuesto por *Gravier et al., (2006)*.

Se trituró en un mortero la muestra de carne seca, se añadieron 10 mL de agua destilada a 90°C y se dejó reposar durante 10 minutos, agitando de vez en cuando. Una vez transcurrido el tiempo se filtró la suspensión. Posteriormente se tomó una alícuota de la solución utilizando un gotero, se colocó una gota de la solución sobre el lente del refractómetro y se observó a través del ocular del refractómetro la concentración de NaCl en la solución. La escala del refractómetro para leer salinidad está dada en partes por mil (‰).

Para la determinación de NaCl en la muestra se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\%NaCl \text{ en la muestra seca} = \frac{(\text{masa de la solución} * X NaCl)}{\text{masa muestra seca}} \times 100 \quad \text{Ec. 25}$$

$$g NaCl \text{ en la muestra} = X NaCl (\text{peso de la muestra seca}) \quad \text{Ec. 26}$$

Donde *XNaCl* es la concentración de sal en la solución leída en el refractómetro entre mil.

## 2.4 *Objetivo particular 1*

Para cumplir este objetivo se llevó a cabo la siguiente secuencia experimental.

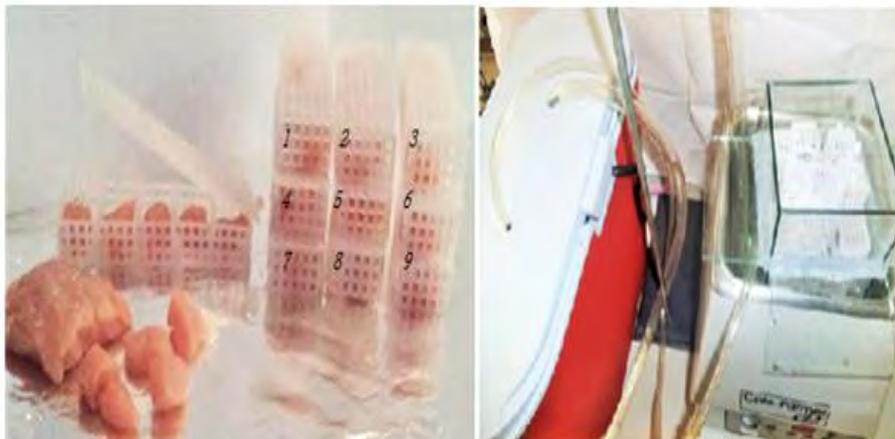
### 2.4.1 *Deshidratación osmótica (DO)*

Durante la experimentación se utilizó lomo de cerdo fresco (*Longissimus dorsi*). La carne provino de cerdos castrados de 6 meses de edad, con un peso promedio de 110 kilogramos, los cuales fueron sacrificados en condiciones homogéneas y adquiridos de un proveedor local del municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México. Las piezas de lomo se obtuvieron 48 horas después del sacrificio y fueron almacenadas bajo condiciones de enfriamiento controladas.

Para las soluciones osmóticas se utilizaron disoluciones de NaCl en agua destilada con una concentración del 17% m/m. Para la elaboración de las disoluciones se utilizó sal de grano (cloruro de sodio) de uso comercial, siempre de la misma marca.

Para la realización de este objetivo se llevaron a cabo dos tipos de tratamientos con 3 réplicas cada uno: Deshidratación osmótica con y sin sonicación; ambos procesos se realizaron con las siguientes condiciones de trabajo: con una relación en peso de solución:carne de 19:1, para evitar cambios en la concentración de la solución hipertónica durante el proceso de deshidratación, una temperatura de 10 °C y un tiempo de proceso de 2 horas.

Posteriormente el lomo de cerdo se cortó en cubos de 2 cm aproximadamente, se pesó cada cubo (peso inicial) y se formaron 9 grupos experimentales. Cada grupo experimental contenía 5 cubos de carne y estos fueron colocados en los porta muestras. Después los 9 grupos experimentales se introdujeron de forma simultánea dentro de la celda vidrio, la cual se colocó dentro del baño ultrasónico (*Figura 18*); se le agregó la solución hipertónica y se prendió el baño ultrasónico a una frecuencia constante de 40 kHz. El comienzo de la deshidratación osmótica se marcó a partir del momento en que se le agregó la solución osmótica a las muestras. El proceso de deshidratación duro 2 horas y se removía un grupo experimental a los 10, 20, 30, 40, 50,60, 80,100 y 120 minutos con el fin de evaluar los cambios que ocurren durante el proceso.



**Figura 18:** Sistema de DO con sonicación

Después los cubos deshidratados osmóticamente de cada grupo experimental se escurrieron durante 5 minutos y se secaron superficialmente con papel absorbente para remover el exceso de solución adherida. Posteriormente se pesó de manera individual cada uno de los 5 cubos de cada grupo experimental (peso final), enseguida se les tomó una fotografía para determinar los cambios de color y se les determinó la humedad final de acuerdo al método descrito en el apartado 2.2. Finalmente con los cubos ya secos se determinó el contenido de sólidos de acuerdo al método descrito en el apartado 2.3.

Para tener una referencia de la humedad inicial así como el contenido de sólidos iniciales en la carne sin tratamiento osmótico, se determinaron estos parámetros por triplicado para posteriormente poder calcular los parámetros osmóticos.

El procedimiento anteriormente mencionado se efectuó de la misma forma para el proceso de deshidratación osmótica sin sonicación, a diferencia del montaje del sistema de deshidratación, el cual fue descrito en el apartado 2.1.1 y se puede observar en la *Figura 16*.

#### **2.4.2 Parámetros osmóticos y cinética de deshidratación**

Después de haber obtenido los datos de humedad, así como del contenido de sólidos en la muestra a cada tiempo, se calcularon los parámetros osmóticos: pérdida de agua ( $WL$ ), ganancia de sólidos ( $SG$ ) y pérdida de peso ( $WR$ ) a cada tiempo, estos parámetros se calcularon de la siguiente manera:

$$WL (\%) = \frac{(w_i \cdot X_i - w_f \cdot X_f)}{w_i} \cdot 100 \quad Ec. (27)$$

$$SG (\%) = \frac{[w_f \cdot (1 - X_f) - w_i \cdot (1 - X_i)]}{w_i} \cdot 100 \quad Ec. (28)$$

$$WR (\%) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \cdot 100 \quad Ec. (29)$$

Una vez que se calcularon los parámetros osmóticos se graficó  $WL$  y  $SG$ , así como la humedad y el contenido de sólidos solubles en función del tiempo de deshidratación osmótica.

### 2.4.3 Coeficientes de difusión efectiva

Los coeficientes de difusión de sólidos ( $D_{es}$ ) y agua ( $D_{ew}$ ) se calcularon mediante la resolución de la 2° Ley de Fick, teniendo en cuenta una configuración cubica y se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\ln \left[ \frac{m_t - m_\infty}{m_o - m_\infty} \right] = 3 \ln C_1 - D_{ew} q_1^2 \frac{3}{a^2} t \quad Ec. 30$$

$$\ln \left[ \frac{S_t - S_\infty}{S_o - S_\infty} \right] = 3 \ln C_1 - D_{es} q_1^2 \frac{3}{a^2} t \quad Ec. 31$$

Los valores de difusión  $D_{es}$  y  $D_{ew}$  se determinaron a partir de las pendientes de las curvas obtenidas de los gráficos  $-\ln\left(\frac{S_r}{C_1^3}\right)$  y  $-\ln\left(\frac{M_r}{C_1^3}\right)$  vs tiempo ( $t$ ).

Para obtener los valores de los coeficientes de difusión a cada tiempo se ajustó el modelo propuesto por *Azuara et al., (1992)*. Este modelo cinético asocia la pérdida de agua ( $WL$ ) con el tiempo, en función de dos constantes  $S_1$  y  $WL_\infty$ . De igual manera asocia la ganancia de sólidos ( $SG$ ) con sus respectivas constantes,  $S_2$  y  $SG_\infty$ .

$$WL = \frac{S_1 t (WL_\infty)}{1 + S_1 t} \quad \text{Ec. 32}$$

$$SG = \frac{S_2 t (SG_\infty)}{1 + S_2 t} \quad \text{Ec. 33}$$

Combinando la segunda ley de Fick para una configuración cúbica (Ec. 12 y 13) con el modelo de Azuara, las ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de difusión a cada tiempo para agua ( $D_{ew}$ ) y sólidos ( $D_{es}$ ) quedan de la siguiente manera:

$$D_{ew} = \frac{a^2}{3tq^2} \left[ \left( \frac{S_1 t}{1 + S_1 t} \right) \left( \frac{WL_\infty^{mod}}{WL_\infty^{exp}} \right) \right] \quad \text{Ec. 34}$$

$$D_{es} = \frac{a^2}{3tq^2} \left[ \left( \frac{S_2 t}{1 + S_2 t} \right) \left( \frac{SG_\infty^{mod}}{SG_\infty^{exp}} \right) \right] \quad \text{Ec. 35}$$

#### 2.4.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó empelando el software MINITAB 16, mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) del 5% para evaluar las diferencias significativas que pudieran existir entre las 3 repeticiones que se realizaron de cada tratamiento (DO con y sin ultrasonido).

Una vez que se eliminaron los valores atípicos, se aplicó otra ANOVA de dos vías entre las réplicas, a fin de obtener los promedios con los que se realizaron los cálculos de la experimentación (parámetros osmóticos y los coeficientes de difusión efectiva de agua y sólidos).

## 2.5 Objetivo particular 2

La determinación de los parámetros de perfil de color en las muestras deshidratadas con y sin sonicación se llevó a cabo por medio del sistema de visión computarizada, el cual consistió en la toma de fotografías de las muestras para posteriormente ser procesadas y analizadas por medio del Software Adobe Photoshop.

### 2.5.1 Determinación de los parámetros de perfil de color

Al inicio de cada experimentación se tomó una fotografía de la materia prima para tener la referencia del color de la carne de cerdo fresca (sin tratamiento osmótico) y posteriormente poder calcular la diferencia de color ( $\Delta E^*$ ).

Para determinar los cambios de color que ocurrieron durante la deshidratación osmótica con y sin sonicación, como se mencionó anteriormente, cada vez que un grupo experimental se retiraba del proceso de deshidratación, los 5 cubos de cada grupo eran escurridos y secados para remover el exceso de solución hipertónica, e inmediatamente se colocaban en el soporte de muestras (figura 19) para posteriormente realizar la adquisición de las fotografías.



Figura 19: Captura de fotografías

Las fotografías obtenidas se transfirieron a una computadora marca Hp con Windows 7 Home Basic, con un procesador Intel Pentium. Para determinar la distribución de color mediante coordenadas colorimétricas del espacio CIE  $L^*a^*, b^*$  en las muestras; las imágenes se cambiaron a formato TIFF. Posteriormente las fotografías fueron analizadas en Adobe Photoshop CS5, en donde se seleccionó un área en la parte

central de cada cubo, esta área se midió en píxeles y debe ser aproximadamente igual para cada determinación. Una vez seleccionada el área se hizo uso de la ventana de histograma (figura 20), la cual despliega las estadísticas (media, desviación estándar, promedio) del valor de  $L$  (luminosidad), así como la cromaticidad  $a$  (rojo (+) a verde (-)) y la cromaticidad  $b$  (amarillo (+) a azul (-)). La determinación de los valores de  $L$ ,  $a$  y  $b$  en las muestras se realizó por triplicado en cada una de las 5 muestras de cada grupo experimental.

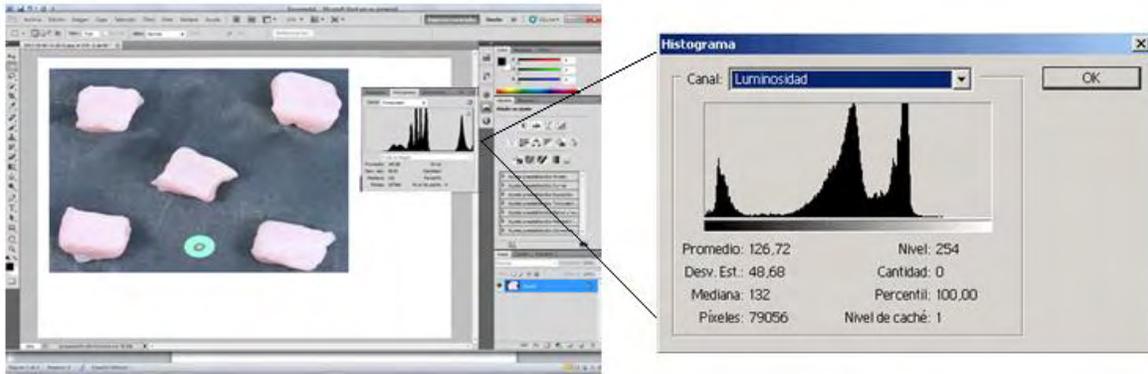


Figura 20: Histograma de las coordenadas colorimétricas  $L$ ,  $a$ ,  $b$

Es importante mencionar que los valores que se muestran en el histograma no son valores de color estándar. Sin embargo, pueden ser convertidos a  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  utilizando las siguientes ecuaciones (Yam & Papadakis, 2004):

$$L^* = \frac{L}{255} \times 100 \quad \text{Ec. 36}$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120 \quad \text{Ec. 37}$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120 \quad \text{Ec. 38}$$

Obtenidos los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se estimó la diferencia total de color ( $\Delta E^*$ ) a determinado tiempo (Corzo, Bracho & Millan, 2008) así como las coordenadas polares  $C^*$  (croma o saturación) y el  $^{\circ}\text{Hue}$  (tono o matiz) (Melgarejo et al., 2004) y se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Ec. 39}$$

$\Delta L^* = L^* \text{muestra} - L^* \text{referencia}$

$\Delta a^* = a^* \text{muestra} - a^* \text{referencia}$

$\Delta b^* = b^* \text{muestra} - b^* \text{referencia}$

Donde la referencia es la carne fresca

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 40}$$

$$^{\circ}H = \arctan(b^*/a^*) \quad \text{Ec. 41}$$

### 2.5.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó empelando el software MINITAB 16, mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) del 5% para evaluar las diferencias significativas entre los repeticiones.

Una vez que se eliminaron los valores atípicos, se aplicó otra ANOVA de dos vías entre las réplicas, a fin de obtener promedios estadísticamente confiables de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  con los que se realizó el cálculo del  $\Delta E^*$ ,  $C^*$  y el  $^{\circ}H$

# Capítulo 3

## Resultados

A continuación se presentan los resultados más relevantes que llevaron a cubrir los objetivos planteados.

La carne fresca antes de la deshidratación osmótica presentó un porcentaje de humedad promedio de  $74.07 \pm 0.23$  %. El contenido de NaCl fue del 0%, debido a que su contenido inicial es mínimo, por lo tanto se consideró como cuantitativamente despreciable. Valores similares fueron reportados por *Gravier, et al. (2006)*.

### 3.1 Parámetros osmóticos

La evolución de la transferencia de masa fue analizada en términos de las cinéticas de deshidratación osmótica por medio de la pérdida de agua y ganancia de sólidos, así como el coeficiente de difusión efectiva.

En la *figura 21* se representa la pérdida de agua (WL) y la ganancia de sólidos (SG) durante la deshidratación osmótica de carne de cerdo con y sin ultrasonido, en donde se puede observar que, para ambos tratamientos, conforme aumentó el tiempo de procesamiento hubo transferencia de masa de agua y sólidos, sin embargo para las muestras que se trataron con ultrasonido se obtuvo una mayor pérdida de agua y una menor cantidad de NaCl en la muestras.

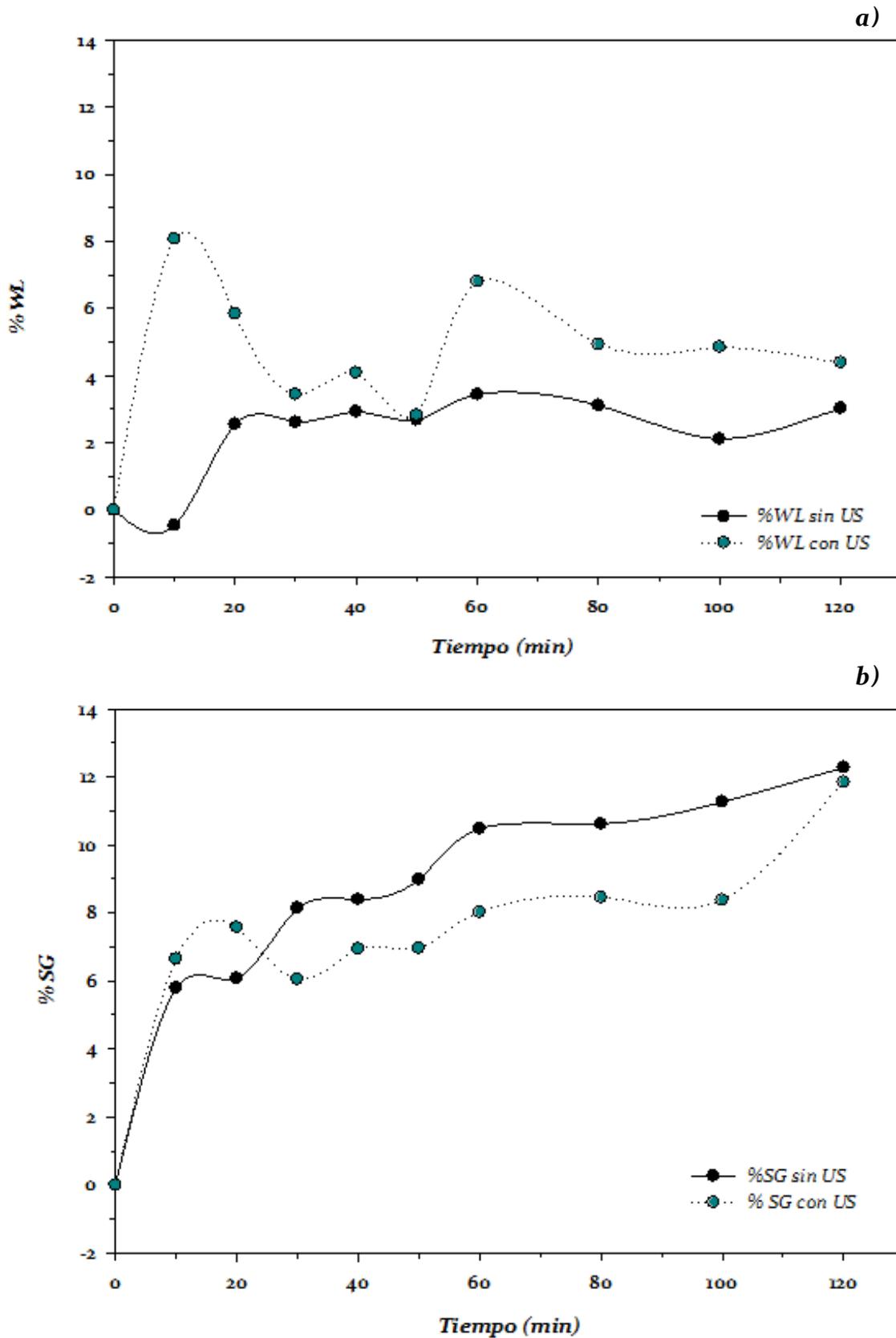


Figura 21: Parámetros osmóticos: a) pérdida de agua (WL) y b) ganancia de sólidos (SG) durante la deshidratación osmótica de carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) con y sin ultrasonido.

Diversas investigaciones como la de *Lazarides, Mitrakas & Matsos, (2007)* han demostrado que la transferencia de masa durante un proceso de DO está fuertemente afectada por la naturaleza del alimento, así como de las variables de procesamiento. Debido a que ambos tratamientos se llevaron a cabo con las mismas condiciones (temperatura, concentración de la solución osmótica, tiempo, y relación alimentos/solución) se puede evidenciar y ver con mayor claridad el efecto que tiene la aplicación de ultrasonido en la transferencia de masa de agua y sólidos.

Se sabe que durante las primeras dos horas de deshidratación ocurre la mayor pérdida de agua, debido a que la diferencia entre las presiones osmóticas en el interior del producto y la solución es mayor; teniendo en cuenta esto podemos analizar los resultados a los 10, 60 y 120 minutos, tiempos en los cuales se observan los mayores cambios en los parámetros osmóticos. En la *figura 21a* se aprecia que para el caso específico de pérdida de agua en el tratamiento con sonicación ocurre la mayor pérdida durante la primera hora de proceso, sin embargo en el tratamiento sin sonicación en los primeros 10 minutos toma valores negativos, lo que significa que lejos de perder agua ganó. Para los 120 minutos de inmersión, se observa que se obtuvo mayor pérdida de agua en el proceso con ultrasonido.

Para una mayor comprensión de los resultados anteriormente presentados, en seguida se muestra la cinética de humedad para la carne deshidratada con y sin ultrasonido (*figura 22*), en donde se puede ver la relación que tiene el tiempo de deshidratación con la reducción en el contenido de humedad, demostrándose que a mayor tiempo de inmersión el producto pierde más agua. Sin embargo en ambos procesos la humedad tiende a subir y bajar conforme pasa el tiempo, este comportamiento está estrechamente relacionado con la penetración del NaCl en la carne. La penetración de la sal en la masa cárnica se traduce en la salida de sus moléculas de agua. Como se sabe la mayor parte del agua presente se encuentra retenida en las miofibrillas, cualquier factor que reduzca el espacio entre los filamentos miofibrilares provocará una disminución en la capacidad de retención de agua. Este fenómeno conocido como “salting in” ocurre en los tratamientos con sal común, en donde el anión cloruro (Cl<sup>-</sup>) se une los filamentos de proteína (con carga positiva) y neutraliza las cargas aumentando la fuerza de repulsión electrostática entre ellos, con el aumento de las fuerzas de repulsión la estructura de las proteínas miofibrilares se despliega teniendo como consecuencia el hinchamiento de las fibras, esto aumenta su capacidad de retención de agua y por lo tanto hay un aumento en la humedad (*Aliño et al., 2010; Siró et al., 2009*). Posteriormente de una expansión sigue una contracción de las miofibrillas debido a la despolimerización de los miofilamentos de miosina por efecto de la alta concentración de NaCl, este fenómeno se conoce como “salting out” y

provoca la deshidratación de las células ya que se reduce la capacidad de retención de agua (Puolanne & Halonen, 2010; Offer & Trinick, 1983).

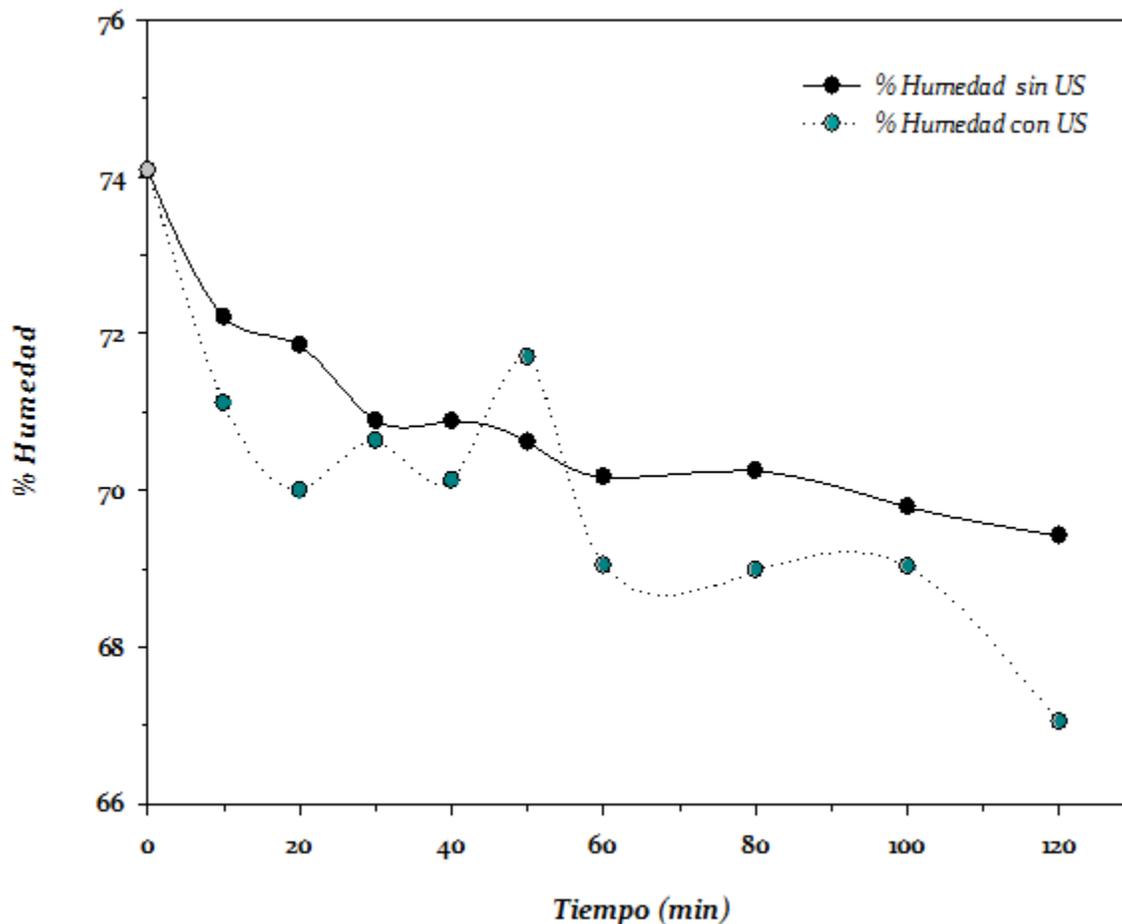


Figura 22: Cinética de humedad para la carne deshidratada con y sin ultrasonido.

A continuación en el Cuadro 1 se muestran los datos de la variación del porcentaje de humedad en la carne deshidratada sin y con ultrasonido, en donde se puede demostrar que en la aplicación de US durante la deshidratación bajó un 9.50% con respecto a su contenido inicial mientras que en el proceso sin ultrasonido solo se redujo un 6.29%. También se puede confirmar que el uso de sonicación contribuye a la reducción del tiempo de deshidratación, ya que sin la aplicación de éste la humedad que se alcanzó al final (120 minutos) fue de 69.03%; sin embargo, con el uso de ultrasonido se obtuvo una humedad similar a los 60 minutos de inmersión, logrando una reducción de tiempo de hasta un 50%.

### Capítulo 3

Cuadro 1. Variación del porcentaje de humedad en carne de cerdo deshidratada osmóticamente con y sin ultrasonido.

	% Humedad			
	Inicial	10 min.	60 min.	120 min.
Sin Ultrasonido	74.07±0.23	72.20 ± 0.54	70.16 ± 0.27	69.41 ± 0.51
Con Ultrasonido	74.07±0.23	71.11 ± 0.61	69.03 ± 0.57	67.03 ± 0.57

En cuanto a la ganancia de sólidos, este es un parámetro muy importante en la DO, porque en algunos casos su incremento en exceso es un fenómeno indeseable, puesto que puede estar asociado a modificaciones de las propiedades sensoriales (Montoya & Rodas, 2012). El porcentaje de NaCl en la carne deshidratada con y sin ultrasonido se representa en la *figura 23*; se observa que para ambos tratamientos la ganancia de sólidos tiende a aumentar considerablemente conforme pasa el tiempo de deshidratación, no obstante el porcentaje de NaCl en las muestras que fueron deshidratadas con ultrasonido fue 4.65% menor en comparación con las deshidratadas sin sonicación. Esto es una ventaja del uso de ultrasonido ya que unos de los objetivos durante la deshidratación osmótica es obtener la mayor pérdida de agua sin la ganancia de tantos sólidos.

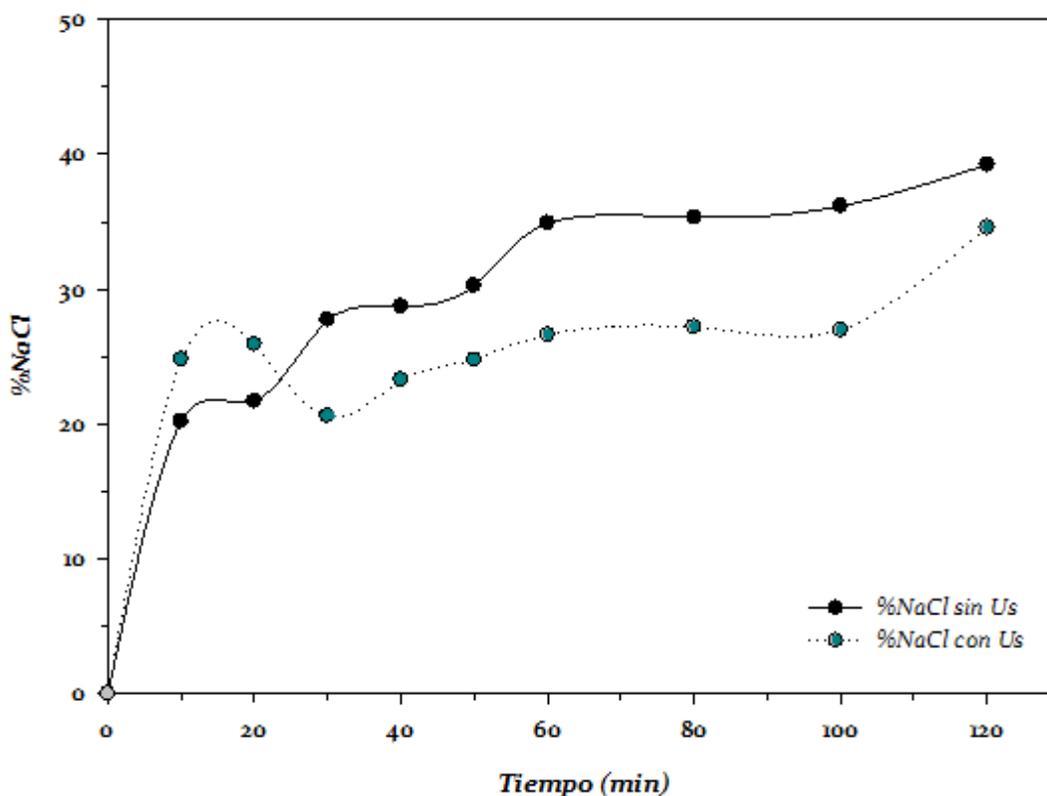


Figura 23: Cinética de NaCl en la carne deshidratada con y sin ultrasonido.

Para explicar las diferencias que existen en cuanto a las velocidades de transferencia de masa de agua y de sólidos entre tratamientos, es importante esclarecer las características particulares que cada método aporta.

En la deshidratación osmótica de carne sin sonicación se presentan varios fenómenos físicos simultáneos en mayor o en menor proporción: osmosis y difusión. En donde la transferencia de agua se debe al fenómeno de osmosis, la fuerza impulsora responsable del fenómeno osmótico es la diferencia de concentración que existe entre la solución hipertónica y la fase líquida contenida en el interior de las células y en los espacios intracelulares de la carne (Aponte *et al*, 2010). Cuando la carne es deshidratada, las células que se encuentran en la superficie alimento y en contacto directo con solución osmótica comienzan a perder agua a través de la membrana celular provocando la destrucción celular, que es la deformación y encogimiento de las células, este fenómeno tiene lugar cuando el medio que las rodea es hipertónico, causando la salida de agua de la célula por osmosis y por lo tanto la deshidratación celular (Roberts, Reiss & Monger, 2000). Después de que las células de la superficie pierden agua se crea una diferencia del potencial hídrico entre las células superiores y las células subsecuentes, éstas últimas bombean el agua hacia las células superiores teniendo como consecuencia la pérdida de agua y su encogimiento. Este proceso continua hasta llegar a las células que se encuentran en el centro del alimento, finalmente el proceso de transferencia de masa tiende al equilibrio después de un largo periodo de contacto entre la carne y la solución (Khin, Zhou & Perera, 2006; Phisut, 2012). La presencia de una capa superficial de células colapsadas por efecto del tratamiento osmótico en el alimento contribuye a aumentar la resistencia al transporte de masa por lo que se obtienen velocidades menores.

Para obtener un producto deshidratado de manera uniforme, es esencial asegurar durante el proceso el movimiento de la solución osmótica mediante la aplicación de una fuerza externa, de modo que la solución que fluye sobre la superficie del alimento se renueve constantemente. El tratamiento sin sonicación supone un tratamiento convencional de deshidratación osmótica, el cual se llevó a cabo de manera estática; diversas investigaciones han demostrado que hay mayor transferencia de masa en condiciones dinámicas (agitación) en comparación con condiciones estática (sin agitación) (Collignan *et al*, 2001; Shi & Xue, 2009). La ausencia de una fuerza externa, puede traer efectos negativos como la formación de una capa de NaCl debido a la ganancia de sólidos, que bloquea la superficie del alimento. Esta capa es una resistencia adicional a la transferencia de masa y reduce la velocidad de deshidratación, debido a que promueve la alteración del gradiente de concentración

que existe entre el alimento y la solución osmótica, teniendo como consecuencia la disminución de la fuerza impulsora para el flujo de agua (Lazarides, Mitrakas & Matsos, 2007).

Por otra parte la deshidratación con sonicación además del efecto de osmosis, la difusión de agua y sólidos es favorecida por las ondas ultrasónicas de alta intensidad, las cuales generan diferentes efectos según sea el medio en que se propaguen. En un medio sólido las ondas ultrasónicas causan una serie de rápidas y sucesivas compresiones y expansiones, este efecto es similar a cuando una esponja es exprimida y se suelta de manera continua, por lo tanto se le conoce como el “efecto esponja” (Phisut, 2012). Mientras que en un medio líquido se produce el fenómeno de cavitación, que es la formación de micro burbujas, que cuando alcanzan un tamaño crítico implosionan y se crea un microjet, que es la liberación de toda la energía acumulada en el interior de las burbujas (McDonnell, Lyng & Allen, 2014).

Además de los efectos anteriormente mencionados la cavitación puede causar daños estructurales a la carne. La implosión asimétrica de las burbujas cerca del alimento, produce el choque de los microjets en dirección a la superficie, ocasionando un daño en la membrana celular (Fernandes, Linhres & Rodrigues, 2008), permitiendo una mayor movilidad de la solución hacia el interior del alimento; algunos autores asumen que los microjets pueden actuar como un sistema de micro inyección (Cárcel et al., 2007; McDonnell, Lyng & Allen, 2014). Otra secuela del uso de ultrasonido es el efecto esponja, que es responsable de la creación de canales microscópicos en la matriz del alimento, lo que provoca mayor penetración de la solución osmótica hacia el interior de la carne, el aumento de la superficie de contacto entre el alimento y la solución ayuda a mejorar la de transferencia de masa (Fernandes, Oliveira & Rodrigues, 2007; Vilkhv et al., 2008).

Precedentemente se mencionó que la agitación es una variable que puede afectar la transferencia de masa. Durante el proceso de deshidratación sin sonicación, conforme se va extrayendo el agua que se encuentra en el interior de las células de la carne ocurre una dilución de la solución que está en la interfase sólido-líquido, provocando que la concentración de la solución hipertónica no sea homogénea, esto se debe a la falta de una fuerza mecánica externa. Sin embargo otro efecto del ultrasonido es que puede funcionar como sistema de micro agitación debido el fenómeno de cavitación. A diferencia del tratamiento sin ultrasonido, la micro agitación que existe durante la deshidratación osmótica con sonicación permite la renovación de la solución que se encuentra alrededor de la muestra, restaurando la diferencia de concentración y así favoreciendo el transporte de masa por convección (Rodrigues & Fernandes, 2007;

*Tonon, Baroni & Hubinger, 2007*), es decir que el tratamiento supone una solución homogénea, dado que se mantiene en recirculación constante. Adicionalmente la agitación reduce la formación de una capa de sólidos en la interfase sólido-líquido (*Bohuon et al., 1998; Cárcel et al., 2007; Siro et al., 2009*).

Por los resultados obtenidos y por los puntos anteriormente mencionados se puede decir que con la aplicación de sonicación la pérdida de agua fue mayor, ya que daña la estructura de la membrana celular, permitiendo la difusión entre zonas internas y externas de las células, convirtiendo así al ultrasonido en la variable dominante y determinante en el incremento de transferencia de materia. Es importante mencionar que los efectos del ultrasonido dependerán de la frecuencia, de la estructura del alimento, así como del medio en el cual se propaguen las ondas entre otros (*Fernandes, Linhres & Rodrigues, 2008*).

### 3.2 Coeficientes de difusión de NaCl ( $D_{es}$ ) y agua ( $D_{ew}$ )

Realizar una comparación de la difusión de agua y sólidos durante el proceso de deshidratación osmótica de carne con otros trabajos es difícil, debido a los diferentes métodos y modelos empleados para estimarla, pero lo más importante son las diferencias en la variación, en la composición y sobre todo en la estructura de los alimentos empleados. En la *figura 24* se presentan las variaciones de los coeficientes de difusión de NaCl ( $D_{es}$ ) y agua ( $D_{ew}$ ) con respecto al tiempo para el tratamiento con y sin ultrasonido. Como se observa en la *figura 24a* los coeficientes de difusión de agua para ambos tratamientos, no presentaron diferencia significativas sin embargo con el uso del ultrasonido la movilidad es mayor. La difusión de NaCl desde la solución hacia la carne es un proceso complejo, por lo que no se puede describir con un coeficiente de difusión constante. En la *figura 24b* se observa que el comportamiento de los coeficientes es diferente entre los tratamientos, con ultrasonido los coeficientes de difusión son mayores en especial al inicio del proceso donde ocurre una mayor ganancia de sólidos durante los primeros 10 minutos, para posteriormente ir disminuyendo conforme aumenta el tiempo; la rápida difusión al inicio del proceso se le puede atribuir a la diferencia de concentración entre la solución y la carne (*Falade, Igbeka & Ayanwuyi, 2007*). Los coeficientes de difusión se pueden ver afectados por los cambios estructurales que suceden durante la deshidratación como desnaturalización de las proteínas, el hinchamiento y deshidratación de las fibras. Los valores obtenidos concuerdan con los reportados por *Siro et al. (2009)* y *Fox (1980)*.

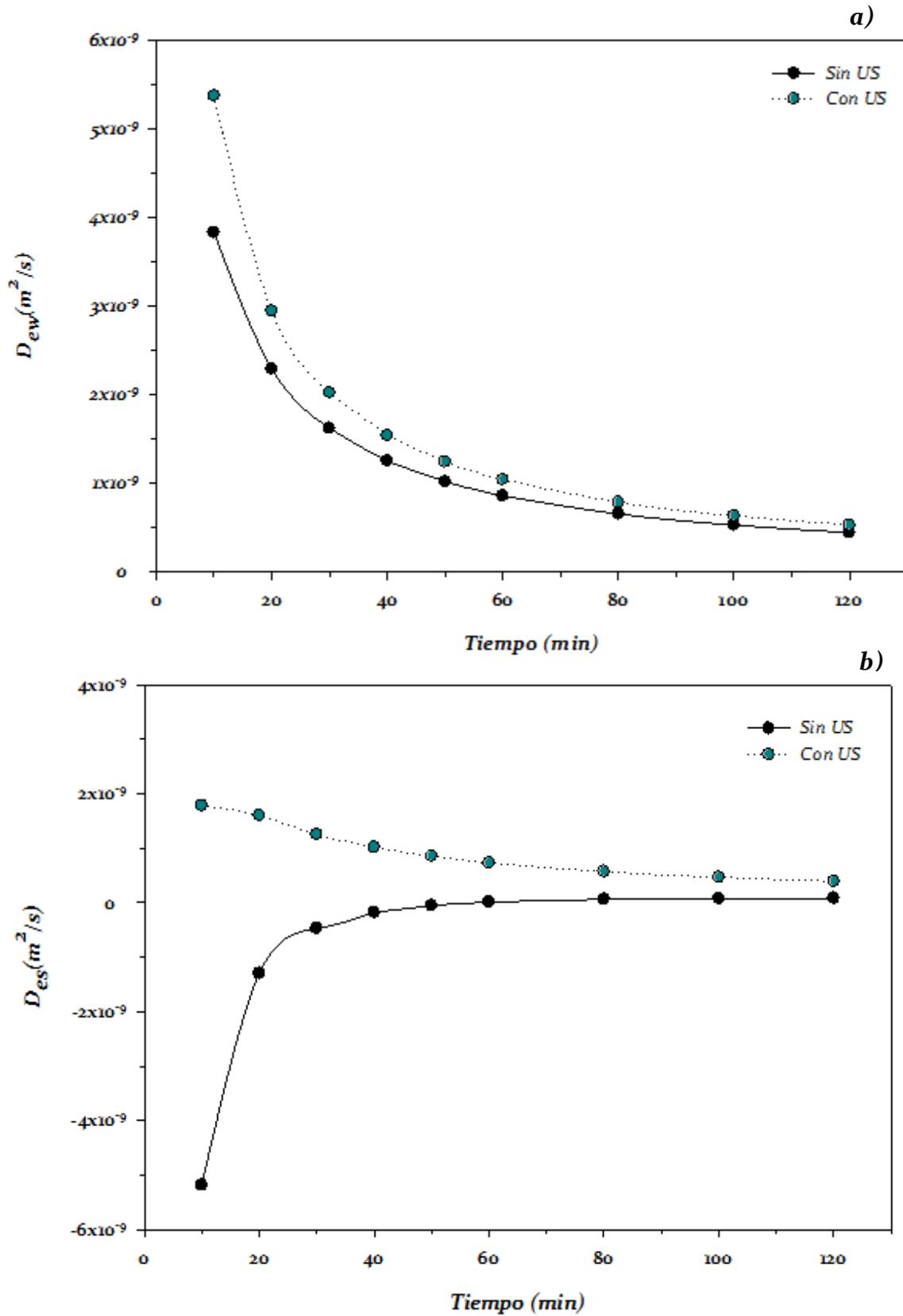


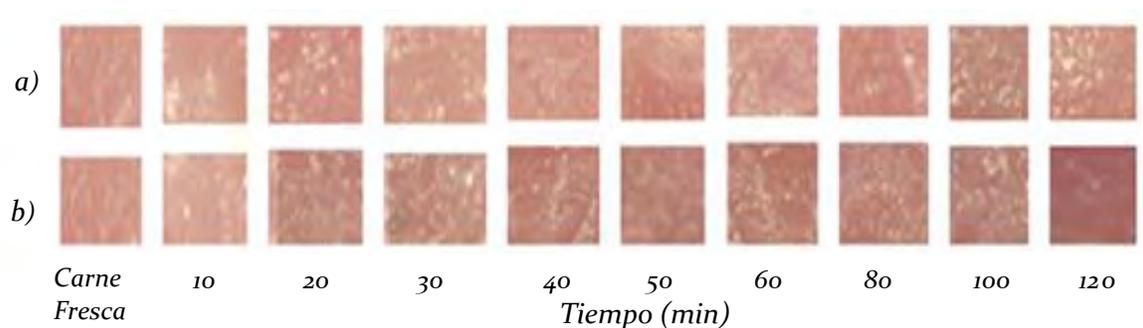
Figura 24: Coeficientes de difusión de agua ( $D_{ew}$ ) y NaCl ( $D_{es}$ ) a) sin ultrasonido y b) con ultrasonido.

### 3.3 Parámetros de perfil de color

La apariencia en los alimentos es el atributo que más impacto causa en el consumidor a la hora de escoger un producto. Entre los atributos que definen la calidad de la carne se encuentran: composición, nutrientes, la terneza, jugosidad, sabor, aroma, y el color, siendo este último de especial importancia para los consumidores, ya que es una de las principales propiedades sensoriales que observa y a menudo influye en la evaluación de la calidad de la carne; debido a que espera un determinado color para cada alimento y cualquier alteración en este parámetro, puede influir en su aceptabilidad (Lu et al., 2000; Chmiel, Slowinski & Dasiewicz, 2011; Corzo, Bracho & Millan, 2008). La influencia del color en el procesamiento de alimentos también es importante ya que es un parámetro sensorial que se debe considerar durante las diferentes etapas que abarca el procesamiento, desde el proceso de selección, elaboración hasta el consumo. Todos los puntos anteriormente mencionados pueden ser considerados como argumentos que justifican el uso del color como un parámetro de selección y de control de calidad (Artigas; Capilla & Pujol, 2002; Hernández & López, 2010).

El color de la carne se ve afectado por diversos factores intrínsecos y extrínsecos, los factores intrínsecos hacen referencia a las características físicas de la carne: las características de la fibra muscular, tales como la concentración de pigmentos (especialmente mioglobina), el estado químico de la mioglobina y las características físicas de la carne; mientras que los factores extrínsecos hacen referencia a factores externos como lo son las condiciones de proceso en las que se realiza un producto (Kim et al., 2010; Joo et al., 2013).

Los siguientes resultados permitieron describir las variaciones de color en carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) deshidratada con y sin sonicación. En la *figura 25* se observa una representación de las imágenes digitales obtenidas de la carne al inicio del tratamiento (carne fresca) y las imágenes de la carne a los mismos tiempos en los que se evaluaron los parámetros osmóticos durante la de deshidratación osmótica con y sin ultrasonido (10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 y 120 minutos), donde se puede observar que los cambios de color se presentaron de manera progresiva conforme aumentaba el tiempo de deshidratación, haciéndose más evidente al final del proceso.



**Figura 25:** Imágenes de los cambios de color durante la deshidratación osmótica de carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) **a)** sin ultrasonido y **b)** con ultrasonido

La percepción del color depende de las características físicas del alimento, ya que en un medio ópticamente no homogéneo como es la carne (su índice de refracción no es uniforme) ya que tiene aire, líquido y diferentes sólidos dispersos en su interior; por lo tanto, estas diferencias en la estructura puede causar múltiples reflexiones y refracciones, según sea el medio en el que se propague la luz (Girolami et al., 2013).

A continuación se presentan los valores promedio de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , con las cuales se evaluaron los cambios color en las muestras deshidratadas con y sin ultrasonido.

En la *figura 26*, se presentan los valores obtenidos de la coordenada  $L^*$  de las muestras tratadas con y sin ultrasonido, los cambios de luminosidad se pueden relacionar con la transferencia de masa que ocurre durante el proceso de deshidratación así como por los efectos causados por la ondas ultrasónicas. El comportamiento que presentan el parámetro  $L^*$  de subir y bajar durante el proceso de deshidratación con y sin sonicación tiene relación con la difusión de agua y NaCl. Como se mencionó anteriormente, la sal tiene la función de aumentar y disminuir la capacidad de retención de agua, la expansión de las miofibrillas tiene que ver con un aumento en la humedad lo que supone un valor más alto de  $L^*$  mientras que durante el encogimiento de las fibra  $L^*$  tiende a disminuir, debido a la pérdida de agua ya la compactación de las muestras, es decir que cualquier cambio en la estructura afectará como refleja y absorbe la luz el alimento (Awad et al., 2012; Choi et al., 2010). Igualmente el aumento de luminosidad en las muestras deshidratadas sin ultrasonido en comparación con las deshidratadas con sonicación se pueden relacionar con la ausencia del fenómeno de cavitación, ya que permite la formación de una capa de cristales de NaCl en la superficie de las muestras, en consecuencia la luz que llega a la superficie ocasiona que los cristales de NaCl reflejen la luz, provocando el aumento de la luminosidad; en cambio en la carne deshidratada con sonicación los valores de  $L^*$  son menores, esto se puede adjudicar a los efectos que provoca el uso del ultrasonido (daño estructural,

micro agitación, etc.), permitiendo que la solución osmótica penetre de manera más uniforme en el alimento, lo que ayuda a una deshidratación más homogénea debido a la ausencia de la capa de NaCl en la superficie.

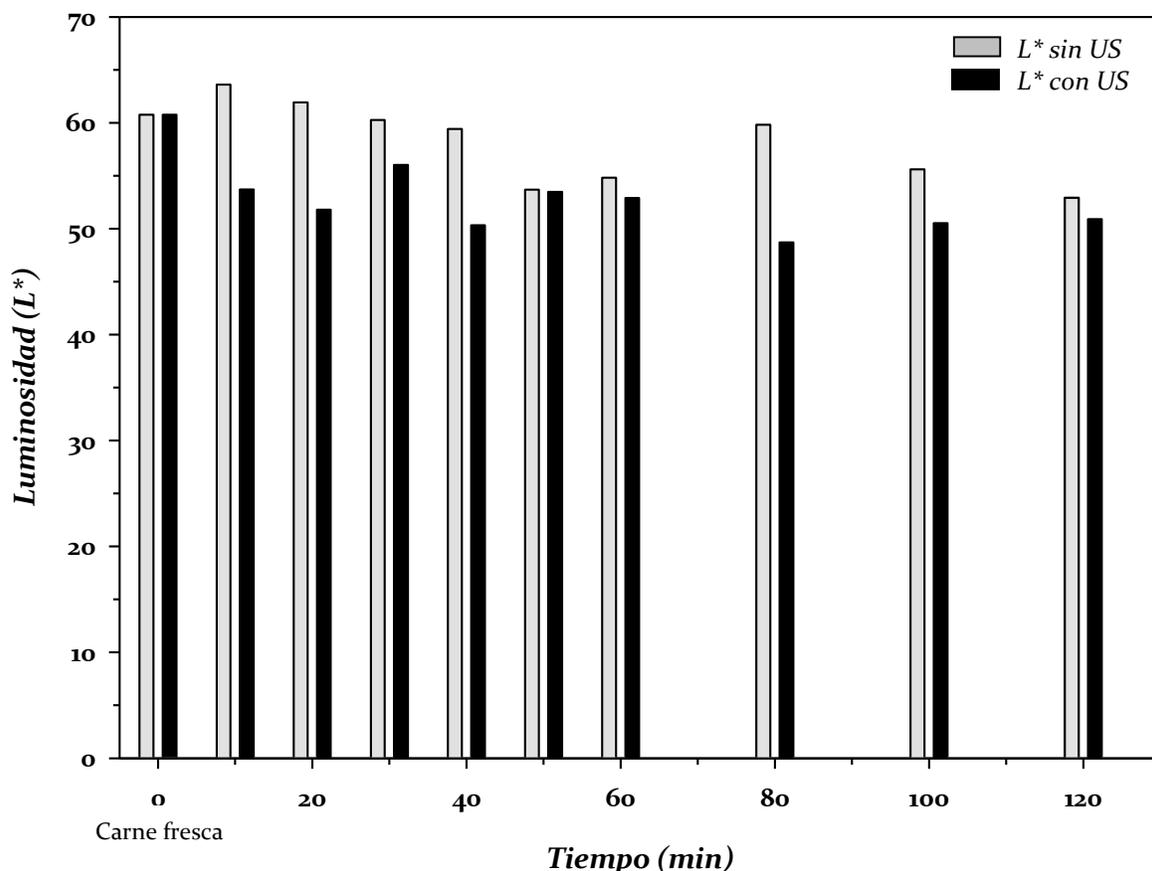


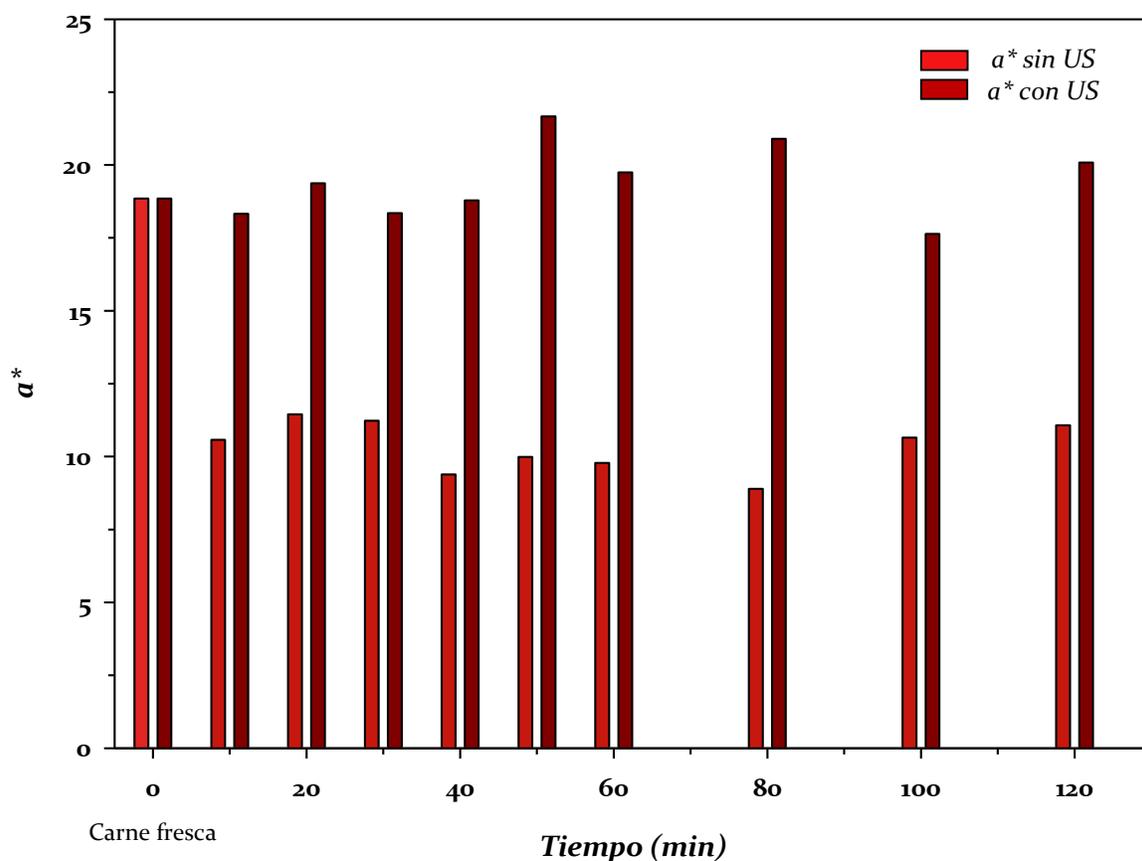
Figura 26: Coordenadas L\* en la carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) deshidratada con y sin ultrasonido.

Además de la luminosidad, el perfil de color de la carne dependerá de la cantidad de mioglobina, que se refleja como la saturación de color rojo y del estado químico de la mioglobina. Los dos factores pueden ser observados mediante colorimetría utilizando las coordenadas colorimétricas a\* y b\*, para la determinación de la cantidad de mioglobina se utiliza el valor de a\* (tendencia a rojo) y para estimar el estado químico se utiliza el valor de b\* (Oyagüe, 2007).

El color de la carne está determinada esencialmente por dos niveles de oxidación del átomo de hierro del grupo hemo. Cuando el hierro ferroso del grupo hemo carece del sexto ligante, el pigmento es llamado desoximioglobina y es de color púrpura (color inicial de la mioglobina) Esta variante de la mioglobina, en presencia de oxígeno (alta presión) se convierte en oximioglobina, ocupando el O<sub>2</sub> la sexta posición del Fe<sup>2+</sup> y es responsable de la apariencia rojo cereza o brillante de la carne fresca. Las dos formas

reducidas de la mioglobina se oxidan a bajas presiones de  $O_2$ : el  $Fe^{2+}$  pasa a  $Fe^{3+}$ , formándose metamioglobina de color marrón, en la que el agua ocupa el sexto enlace (Badui, 1990).

Para el caso de la coordenada colorimétrica  $a^*$ , los valores que se obtuvieron se muestran en la *figura 27*, en donde se puede observar que en ambos tratamientos los valores fueron positivos, lo que indica una tendencia al color rojo; sin embargo, en las muestras con ultrasonido su incremento fue mayor en todos los tiempos. Este aumento se puede relacionar con el fenómeno de cavitación ya que aumenta la penetración del oxígeno. Para la coordenada  $b^*$  (*figura 28*) ambos tratamientos presentaron valores negativos lo que muestra una tendencia al color azul el cual se debe a la oxidación de mioglobina en metamioglobina.



**Figura 27:** Coordenadas  $a^*$  en la carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) deshidratada con y sin ultrasonido.

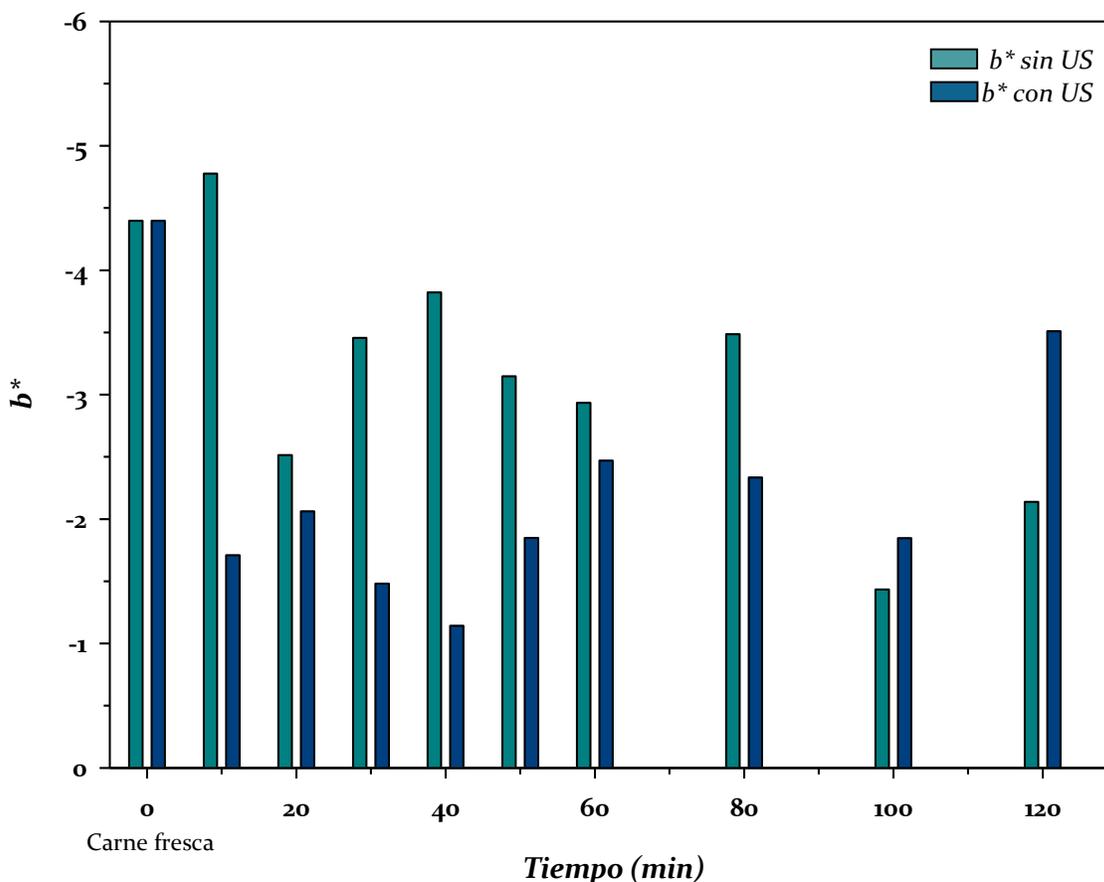


Figura 28: Coordenadas  $b^*$  en la carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) deshidratada con y sin ultrasonido.

Pereira (2010) menciona que la norma ISO 12647-2 es la encargada de la estandarización de los procesos gráficos, la cual establece especificaciones técnicas, métodos de medición del color, así como los rangos de tolerancias que permite la obtención de un mismo resultado de color. Esta norma indica que los umbrales de tolerancia para evaluar la diferencia total de color ( $\Delta E^*$ ) son: valores menores a 3 indican que la diferencia es apenas perceptible y valores superiores a 5 se proponen como inaceptables ya que indican que la diferencia de color es especialmente evidente.

Para obtener los cambios de color que se tienen después de los tratamientos ( $\Delta E^*$ ) se tomó como referencia la carne fresca, por lo tanto su valor inicial es cero. Los resultados obtenidos (figura 29) indican que para ambos tratamientos hubo diferencias perceptibles ya que los valores obtenidos son mayores a 5, sin embargo los cambios fueron mayores en la carne tratada con ultrasonido haciéndose más evidentes al final del proceso. Por otra parte una de las razones por las que las muestras tratadas sin sonicación prestaron menores cambios de color se debe a la formación de una capa de NaCl en la superficie de la carne, la cual impide la salida del pigmento (Corzo, Bracho & Millan, 2008).

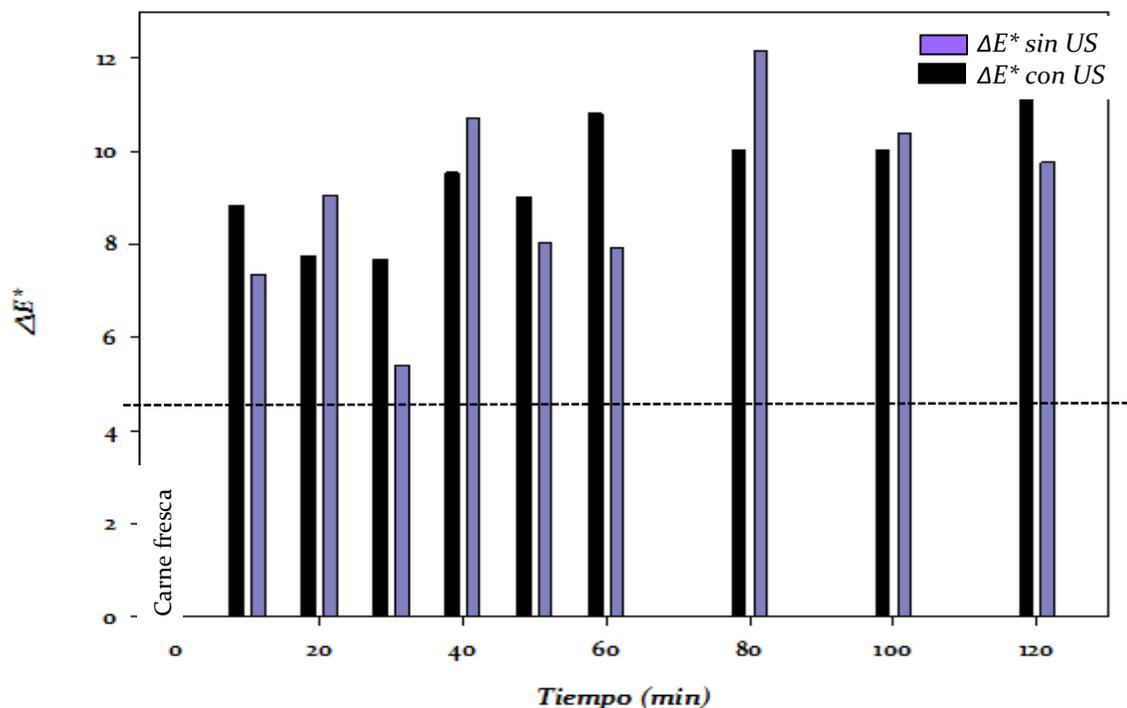


Figura 29:  $\Delta E^*$  en la carne de cerdo (*Longissimus dorsi*) deshidratada con y sin ultrasonido.

En el cuadro 2 se muestran los valores promedio que se obtuvieron de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ , croma y el ángulo hue al inicio y al final de proceso de deshidratación con y sin sonicación; además se presentan los colores resultantes de las coordenadas colorimétricas, los cuales se obtuvieron mediante el programa Adobe Photoshop CS5.

Cuadro 2. Valores promedio de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  y  $\Delta E^*$ , croma y  $^\circ$ Hue al inicio y al final del proceso de deshidratación con y sin ultrasonido.

	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$	*C	$^\circ$ Hue	Imagen digital	Color Adobe Photoshop
Carne fresca (Inicial)	60.53	18.84	-4.39	---	19.35	346.63		
Deshidratación sin ultrasonido (120 min)	52.92	11.07	-2.13	9.76	11.28	349.07		
Deshidratación con ultrasonido (120 min)	50.89	20.08	-3.50	11.11	20.38	350.08		

### Capítulo 3

Una vez que se obtuvieron los valores de  $C^*$  y  $^{\circ}H$  estos se localizaron en el diagrama de cromaticidad CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . En este diagrama (figura 30a) valores de ángulo hue de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  indican que va del color rojo amarillo, de  $90^{\circ}$  a  $180^{\circ}$  la tendencia es de amarillo a verde, de  $180^{\circ}$  a  $270^{\circ}$  va de verde a azul y de  $270^{\circ}$  a  $360^{\circ}$  de azul a morado. En cuanto al cromatismo ( $C^*$ ), éste indica para determinado ángulo la saturación de color, en una escala del 0 al 100 donde este último valor expresa la mayor saturación (Skrlep & Candek-Potoka, 2007; Pereira, et al., 2012). La determinación del cromatismo ( $C^*$ ) y el ángulo hue ( $^{\circ}H$ ) es importante, ya que Hernández & Bonilla (2015) mencionan que el cromatismo se relaciona con la concentración del pigmento, mientras que el ángulo hue representa el estado de la oxidación de la mioglobina. En la figura 30b se presenta la comparación de las coordenadas cromatismo y ángulo hue para ambos tratamientos, el ángulo hue en ambos procesos se mantuvo alrededor del  $350^{\circ}$ , en donde en el espacio de color indica la zona de colores púrpura-rojo, mientras que el valor de cromatismo indica una mayor saturación en la carne deshidratada con ultrasonido.

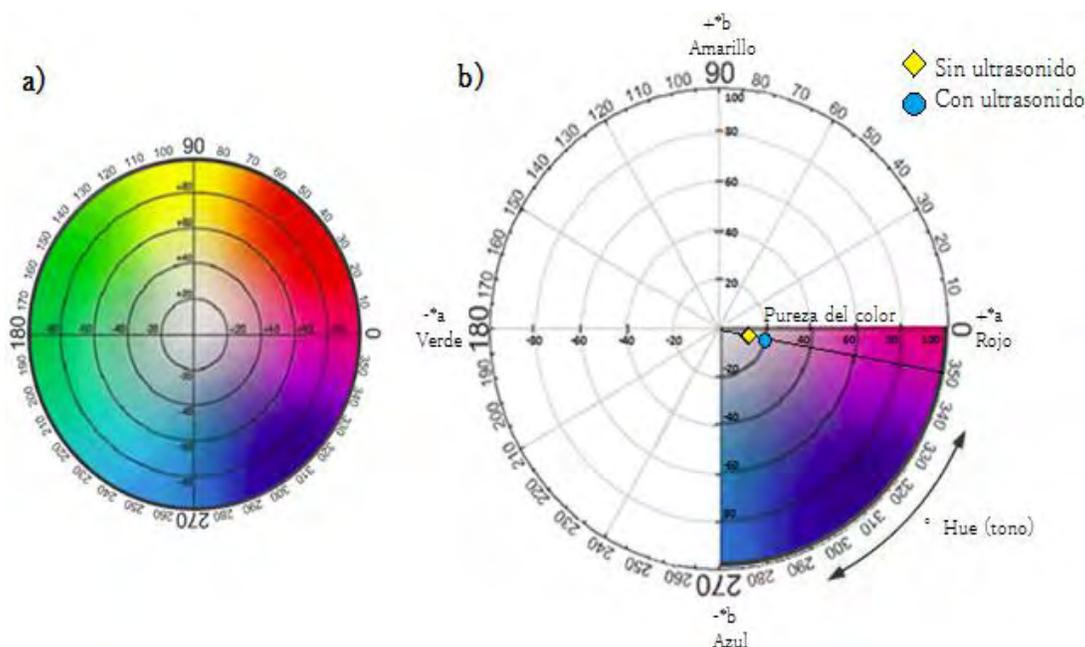


Figura 30: a) Diagrama cromático CIE  $L^*a^*b^*$  y b) ubicación de las coordenadas polares  $C^*$  y  $^{\circ}H$  de la carne deshidratada con y sin sonicación en el diagrama cromático.

### Capítulo 3

Como se puede observar en ambos tratamientos hubo una oxidación de la mioglobina, de acuerdo con los estudios realizados por *Murray (1989)* el grado de oxidación de los pigmentos en carne se puede ver afectado por el pH, la capacidad de retención de agua, humedad, la estructura y la integridad de las células. De los resultados obtenidos se puede decir que las muestras tratadas con sonicación sufrieron mayores cambios de coloración, estos se pueden relacionar con la cavitación en donde la formación de burbujas permite la oxigenación de la mioglobina, además se forma el fenómeno de sonólisis que es la formación de radicales libres de hidróxido (OH) y de hidrogeno (H•) de la disociación de las moléculas de agua en las soluciones acuosas, como resultado de la alta temperatura y la presión que se genera durante la implosión de las burbujas que se forman durante el proceso de cavitación (*Awad et al., 2012*). Éstos radicales libres pueden ser responsables de la oxidación de mioglobina a metamioglobina, la formación de metamioglobina depende de numerosos factores entre ellos la presión parcial de oxígeno, temperatura, pH y en algunos casos el crecimiento microbiano (*Mancini & Hunt, 2005*).

## ❧ Conclusiones ❧

Los objetivos planteados en éste estudio se cumplieron, además los resultados obtenidos proporcionan más información sobre el uso del ultrasonido durante la deshidratación osmótica.

El ultrasonido es una tecnología emergente en la transformación de alimentos, los efectos que ocasiona pueden influir considerablemente en el comportamiento de la deshidratación y en la calidad del producto, ya que las muestras tratadas con ultrasonido favorecieron la pérdida de agua y se obtuvo menor ganancia de sólidos

A partir de los resultados se puede concluir que el empleo de ultrasonido durante la DO puede ser una alternativa para aumentar la transferencia de masa, ya que el efecto esponja así como el fenómeno de cavitación modifican la estructura de la carne, permitiendo mayor penetración de la solución osmótica, lo que genera una mayor pérdida de agua y una deshidratación más homogénea.

Por otra parte los resultados obtenidos de pérdida de humedad demostraron que con el uso de ultrasonido se necesita menos tiempo de tratamiento, lo que ayudaría a conservar las propiedades sensoriales de la carne. Además la reducción del tiempo de procesamiento sería beneficioso tanto para el ámbito económico como el ambiental.

Los resultados obtenidos de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  durante los dos tipos de tratamientos demostraron que el color se ve afectado por la transferencia de masa, así como por el contenido y estado químico de la mioglobina.

En cuanto a la diferencia total de color, ambos procesos tuvieron un efecto, ya que se obtuvieron valores mayores a 5, lo que significa que hubo diferencias perceptibles tendiendo como referencia la carne fresca. Sin embargo los valores obtenidos fueron mayores con uso de ultrasonido, estos cambios se pueden relacionar con los cambios fisicoquímicos, químicos y físicos que se generan con el uso de ultrasonido.

# ❧ Bibliografía ❧

1. Aliño, M., Grau, R., Sánchez-Fernández, A., Arnold, A., & Barat, J. M. (2010). Influence of brine concentration on swelling pressure of pork meat throughout salting. *Meat Science*, 86, 600-606.
2. AMSA. (2012). American Meat Science Association *Meat color Measurement Guidelines*. USA.
3. Anchía, I. A., & Hernández, J. A. (2000). *Alimentos: Composición y propiedades*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España.
4. Andújar, G., Pérez D., & Venegas, O. (2003). *Química y bioquímica de la carne y los productos cárnicos*. Cuba: Universitaria.
5. Anónimo. (Abril 2003) Teoría del color. *NewsTech Co.* (99), 1-4.
6. Anónimo. (Marzo 2003) Teoría del color. *NewsTech Co.* (96), 1-4.
7. Apaza, C. A., & Apaza, G. R. (2010). Deshidratación Osmótica de Alimentos. *Boletín de Divulgación Tecnológica Agroindustrial*, 1, 1-24.
8. Aponte, A. A., Cuartas, C. J., & Cock, L. S. (2010). Cinéticas de deshidratación osmótica de pitahaya amarilla (*Selenicereus magalanthus*). *Interciencia*, 35(7), 1-6.
9. Armeling, C. (2001). *Tecnología de la carne: Antología*. Costa Rica: EUNED
10. Artigas J. M., Capilla, P., & Pujol, J. (2002). *Tecnología del color*. España: Universidad de Valencia.
11. Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control food: A review. *Food Research International*, 48, 410-417.
12. Azuara, E., Cortés, R., García, H.S., & Beristain, C. I. (1992). Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology*, 27, 409-418.
13. Badui, S. (1990). *Química de los alimentos*. México: Alhambra Mexicana.
14. Bello, J. (2008). *Jamón Curado: Aspectos científicos y tecnológicos*. España: Ediciones Díaz de Santos.
15. Bohuon, P., Collignan, A., Rios, G. M., & Raoult-Wack, A. L. (1998), Soaking process in ternary liquids, experimental study of mass transport under natural and forced convection. *Journal of Food Engineering*, 37(4), 451-469.

16. Cárcel, J. A., Benedito, J., Bon, J., & Mullet, A. (2007). High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Science*, 76, 611-619.
17. Chavan, U. D., & Amarowicz, R. (2012). Osmotic dehydration process for preservation of fruits and vegetables. *Journal of Food Research*, 1, 202-209.
18. Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M.K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 813-835.
19. Chmiel, M., Slowinski, M., & Dasiewicz, K. (2011). Lightness of the color measured by computer image analysis as a factor for assessing the quality of pork meat. *Meat Science*, 88, 566-570
20. Choi, Y. M., Lee, S. H., Choe, J. H., Rhee, M. S., Joo, S. T., & Kim, B. C. (2010). Protein solubility is relates to myosin isoforms, muscle fiber types, meat quality traits, and postmortem protein changes in porcine longissimus dorsi muscle. *Livestock Science*, 127, 183-191.
21. Chwastek, A., (2014). Methods to increase the rate of mass transfer during osmotic Dehydration of foods. *Acta Sci. Pol., Technol Aliment*, 13(4), 341-350.
22. Collignan, A., Bohuon, P., Deumier, F., & Poligné, I. (2001). Osmotic treatment of fish and meat products. *Journal of Food Engineering*, 49, 153-162.
23. Corzo, O., Bracho, N., & Millan R. (2008). Cambios de color en las láminas de sardina durante la deshidratación osmótica. *Revista Científica*, 18(4), 424-430.
24. Derossi, A., Pilli, T., Severini, C., & McCarthy, M. J. (2007). Mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of food engineering*, 86, 519-528.
25. Falade, K. O., Igbeka, J. C., & Ayanwuyi, F. A. (2007). Kinetics of mass transfer, and color changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering*, 80, 979-985.
26. Fernandes, F. A. N., Linhres, F. E., & Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15, 1049-1054.
27. Fernandes, F. A., Oliveira, F. I. P., & Rodrigues, S. (2007). Use of Ultrasound for Dehydration of Papayas. *Food Bioprocess Technology*, 1-7.
28. Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82, 261-267.
29. Fernandes, F. A. N., Gallao, M. I., & Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90, 186-190.
30. Fernandez, A. E. (2007). *Evaluación de los cambios físicos de carne de bovino congelada-descongelada y almacenada en refrigeración*. [Tesis Licenciatura Ingeniería en Alimentos]. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
31. Fox, J. B. (1980). Diffusion of chloride, nitrite and nitrate in beef and pork. *Journal of Food Science*, 45, 1740-1744

32. Gal, I., López, M., Martín, A. I., & Prieto, J. (2007). *Bases de la Fisiología*. España: Tébar
33. Girolami, A., Napolitano, F., Faraone, D., & Braghieri, A. (2013). Measurement of meat color using a computer vision system. *Meat Science*, 93, 111-118.
34. Gravier, N., Pinotti, A., Califano, A., & Zaritzky, N. (2006). Diffusion of sodium chloride in pork tissue. *Journal of Food Engineering*, 77, 910-918.
35. Hernández, A. G., & López, M.D. (2010). *Tratado de nutrición Tomo 2: Composición y calidad nutritiva de los alimentos*. España: Médica Panamericana S. A.
36. Hernandez, M. R., & Bonilla, R. M. (2015). *Determinación de la bioconservación del lactobacillus acidophilus sobre salmonella spp., utilizando susuttrato de carne de res*. [Tesis Licenciatura en Química y Farmacia]. Universidad de el Salvador, Republica del el Salvador.
37. Hui, Y. H., & Sherkat, F. (2005). *Handbook of food science technology and engineering 4 volume set*. USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
38. Hui, Y. H., Clary, C., Farid, M. M., Fasina, O. O., Noomhorm, A., & Welti-Chanes, J. (2008). *Food Drying Science and Technology: Microbiology, Chemistry, Applications*. USA: DEStech Publications, INC.
39. Jayasooriya, S. D., Bhandari, B. R., Torley, P., & D'Arcy, B. R. (2004). Effect of high power ultrasound wave son properties of meat: a review. *International Journal of Food Properties*, 7, 301-319.
40. Jayasooriya. S. D., Bhandari, B. R., Torley, P., & D'Arcy, B. R. (2007). Effect of high power ultrasound and ageing on the physicalproperties of bovine *Semitendinosus* and *Longissimus* muscles. *Meat Science*, 75, 628-639.
41. Joo, S. T., Kim, G. D., Hwang, Y. H., & Ryu, Y. C. (2013). Control of fresh meat quality through manipulation of muscle fiber characteristics. *Meat Science*, 95, 828-836.
42. Khin, M. M., Zhou, E., & Perera, C. (2006). A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 77, 84-95.
43. Kim, G. D., Jeong, J. Y., Hur, S. J., Yang, H. S., Jeon, J. T., & Joo, S. T. (2010). The relationship between meat color (CIE L\* and a\*), myoglobin content, and their influence on muscle fiber characteristics and pork quality. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 30, 626-633.
44. Labra, S. (2014). *Desarrollo de un patrón para la evaluación de color de la carne de bovino en México*. [Tesis Maestría en Ciencias]. Universidad Nacional Autónoma de México, México
45. Lazarides, H. N., Mitrakas, G. E., & Matsos, K. I. (2007). Edible coating and counter-current product/solution contacting: A novel approach to monitoring solids uptake during osmotic dehydration of a model food system. *Journal of Food Engineering*, 82, 171-177.

46. Limas, M. J. (2011). *Evaluación de pH, capacidad de retención de agua, color y dureza en el músculo longissimus dorsi de conejo en sus transformación de carne*. [Tesis Licenciatura Ingeniera en Alimentos]. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
47. Lu, J., Tan, J., Shatadal, P., & Gerrard, D. E. (2000). Evaluation of pork color by using computer vision. *Meat Science*, 56, 57-60
48. Mancini, R. A., & Hunt, M. C. (2005). Current research in meat color. *Meat Science*, 71, 100-121.
49. Martínez, C. I., & Aponte, A. (2005). Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *Ciencia y tecnología alimentaria*, 4, 330-342.
50. Mason, T. J., Paniwnyk, L., & Lorimer, J. P. (1996). The use of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 3, 253-256.
51. McClements, J. D. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science & Technology*. 6, 293-299.
52. McDonnell, C.K., Lyng, J.G., & Allen, P. (2014). The use of power ultrasound for accelerating the curing of pork. *Meat Science*, 98, 142-149.
53. Melgarejo, L. M., Hernández, M., S., Barrera, J. A., & Bardales, X. (2004). *Caracterización y usos potenciales del banco de germoplasma de ají amazónico*. Colombia: SINCHI
54. Montoya, J. E., & Rodas, A. (2012). Deshidratación Osmótica de láminas de mango cv. Tommy Atkins aplicando metodología de superficie de respuesta. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 65(1), 6057-6518.
55. Moore, K. L., & Agur, A. M. R. (2003). *Fundamentos de anatomía con orientación clínica*. Argentina: Médica Panamericana S.A.
56. Murray, A. C. (1989). Factors affecting beef color at time of grading. *Can. Journal Animal Science*, 69, 347-355.
57. Nollet, L. M. L., & Toldra, F. (2009). *Handbook of muscles foods analysis*. USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
58. Norma Mexicana. NMX-F-544-1992, Alimentos- Método de prueba para determinación de humedad en productos cárnicos. Foods. Test method for moisture determination in meat products. Normas Mexicanas. Dirección general de normas.
59. Norma Oficial Mexicana. NOM-009-Zoo-1994. *Proceso Sanitario de la carne*. Diario Oficial de la Federación 16 de Noviembre de 1994.
60. Norma Oficial Mexicana. NOM-213-SSA1-2002. *Productos y servicios*. Productos cárnicos procesados, especificaciones sanitarias y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación 18 de agosto 2002
61. Offer, G., & Trinick, J. (1983). On the mechanism of water holding in meat: the swelling and shrinking of myofibrils. *Meat Science*, 8, 245-281.
62. Oyagüe, M. (2007). Estabilidad del color de la carne fresca. *Nacameh (1)* 1, 67-74.

63. Ozuna, C., Puig, A., García Pérez, J. V., Mulet, A., & Cárcel, J. A. (2013). Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*Longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations. *Journal of Food Engineering*, 119, 84-93.
64. Pearson, A. M., & Tauber, F. W. (1984). *Processed Meats*. USA: The AVI Publishing Company, Inc.
65. Pereira, C. A., León, G. M., Hernández, A. I., & González, R. A. (2012). Determinación del color en epicarpio de tomates (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) Con sistema de visión computarizada durante la maduración. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 97-111.
66. Pereira, C. A. (2009). Sistema de visión computarizada y herramientas de diseño gráfico para la obtención de imágenes de muestras de alimentos segmentadas y promediadas en coordenadas CIE-L\*a\*b\*. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 283-301.
67. Pereira, C. A., & León, G. M. (2012). Determinación del color en epicarpios de mango (*Mangifera sp.*) y plátano (*Musa AAB*) en maduración mediante sistema de visión computarizada. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(2), 1-17.
68. Pertierra, A., Rivera, J.M., Gaitán, D., Gutiérrez, C., Oltras, C., & Ramírez, J. (2006). *Fundamentos de bioquímica metabólica*. España: Tébar
69. Phillips, G. O., & Williams, P. A. (2011). *Handbook of food proteins*. USA: Woodhead Publishing
70. Phisut, N. (2012). MiniReview: Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *International Food Research Journal*, 19(1), 7-18.
71. Puolanne, E., & Halonen, M. (2010). Theoretical aspects of water- holding in meat. *Meat Science*, 86, 151-165.
72. Rahman, M. S. (2007). *Handbook of food preservation*. USA: CRC Press
73. Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjan, K., & Knorr, D. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 13, 48-59.
74. Riva, M., Campolongo, S., Leva, A. A., Maestrelli, A., & Torreggiani, D. (2005). Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Research International*, 38, 533-542.
75. Rivera, M., & Magro, E. (2008). *Bases de la alimentación humana*. España: Netbiblo.
76. Roberts, M., Reiss, M., & Monger, G. (2000). *Advanced Biology*. United Kingdom: Nelson.
77. Rocca, P. D. (2010). *Secado de alimentos por métodos combinados: deshidratación osmótica y secado por microondas y aire caliente*. [Tesis Maestría en Tecnología de los alimentos]. Facultad Regional de Buenos Aires, Buenos Aires.

78. Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2007). Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons. *Drying Technology*, 25, 1791-1796.
79. Romero, J. F. (2013). *Desarrollo de un producto reestructurado de carne de res tipo roast beef mediante la aplicación de transglutaminasa y caseinato de sodio*. [Tesis Licenciatura Ingeniería en Alimentos]. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
80. Sakata, R., & Nagata, Y. (1992). Heme pigment content in meat as affected by the addition of curing agents. *Meat Science*, 32, 343-350.
81. Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., & Rizvi, S. S. H. (2003). *Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. México: Limusa.
82. Shi, J., & Xue, J. S. (2009), Application and development of osmotic dehydration technology in food processing. En Ratti, C. (Ed.). *Advances in food dehydration*, (187-205), USA: CRC.
83. Sicar, S., Coter, G., & Salazar, L. (2012). *Fisiología humana. México: El manual moderno S. A de C. V.*
84. Silverthorn, D. U., Johnson, B. R., Ober, W. C., & Garrison, C. W. (2009). *Fisiología humana: un enfoque integrado*. Buenos Aires: Médica Panamericana.
85. Siro, I., Vén, C., Balla, C., Jónás, G., Zeke, I., & Friedrich, L. (2009). Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. *Journal of Food Engineering*, 91, 353-362.
86. Skrlep, M., & Candek-Potokar, M. (2007). Pork color measurement as affected by bloom time and measurement location. *Journal of Muscle Foods*, 18, 78-87.
87. Sutar, N., & Sutar, P.P. (2013). Development in osmotic dehydration of fruits and vegetable: a review. *Trends in Post Harvest Technology*, 1,20-36.
88. Tonon, R. V., Baroni, A. F., & Hubinger, M. (2007). Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. *Journal of Food Engineering*, 1-9.
89. Tornberg, E. (2005). Effects of heat on meat proteins- Implications on structure and quality of meat products. *Meat Science*, 70, 493-508.
90. Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2007). *Introducción a la microbiología*. Buenos Aires: Médica Panamericana.
91. Vilkh, K., Mawson, R., Simons, L., Bates, D. (2008). Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the Food industry- A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 161-169.
92. Xiong, Y. L. (2005). Role of myofibrillar proteins in water-binding in brine-enhanced meats. *Food Research International*, 38, 281-287.
93. Zelanski, P. J. & Fisher, M. P. (2009.) *Color*. USA: Prentice Hall.

≈ Bibliografía ≈

94. Yam, K. L., & Papadakis, S. E. (2004). A simple imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61, 137-142.

≈ Páginas web ≈

1. <http://faculty.etsu.edu/forsman/histologyofmuscleforweb.htm>
2. <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab>
3. <http://www.bioenciclopedia.com/wp-content/uploads/2015/06/tipos-musculo.jpg>
4. <http://www.ctgclean.com/blog/technology-library/articles/ultrasonic-cleaning-fundamental-theory-and-application/>
5. <http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/10-Sistema%20Motor/10a-Movimiento/Textos/MuscAnatomia.html>
6. <http://www.pion.cz/es/article/?catID=33>
7. <http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Histologia/epitelio22.php>
8. Pereira, J. (Diciembre 2010). ¿Cómo se si mi perfil de color es correcto? Recuperado el 05 de Diciembre 2016, de <http://www.jpereira.net/rough-profiler/validar-perfil-color-icc-delta-e>