

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**APLICACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS DE ALTA INTENSIDAD EN LAS
PROPIEDADES DE LA CARNE FRESCA Y MADURADA DE BOVINO**

POR:

M. C. ESMERALDA MÓNICA PEÑA GONZÁLEZ

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR IN PHILOSOPHIA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

JULIO DE 2017.



Aplicación de ondas ultrasónicas de alta intensidad en las propiedades de la carne fresca y madurada de bovino. Tesis presentada por Esmeralda Mónica Peña González como requisito parcial para obtener el grado de Doctor in Philosophia, ha sido aprobada y aceptada por:

Ph. D. Carlos Ortega Ochoa
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

Ph. D. Alma Delia Alarcón Rojo
Secretaria de Investigación y Posgrado

D. Ph. Agustín Corral Luna
Coordinador Académico

Ph. D. Alma Delia Alarcón Rojo
Presidente

Fecha: 05 Julio 2017

Comité:

Ph. D. Alma Delia Alarcón Rojo
Ph. D. Ana Luisa Rentería Monterrubio
Ph. D. Armando Quintero Ramos
Dr. Eduardo Santellano Estrada
Ph. D. Iván Adrián García Galicia

© Derechos Reservados
ESMERALDA MÓNICA PEÑA GONZÁLEZ
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO FRANCISCO R.
ALMADA KM. 1, CHIHUAHUA, CHIH.,
MÉXICO C.P. 31453

JULIO 2017

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme nuevamente el soporte económico durante mi formación doctoral.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua a través de la Facultad de Zootecnia y Ecología por ser la institución que me dio la oportunidad de formación en posgrado.

A mi directora de investigación Ph. D. Alma Delia Alarcón Rojo, quien con su sencillez y profesionalismo me dio la oportunidad de aprender que en el camino del investigador hay mucho que hacer y aprender, que con esfuerzo y paciencia todo es posible.

A los miembros del comité de esta investigación por dar su tiempo y conocimiento para el desarrollo y finalización de este trabajo; Ph. D. Ana Luisa Rentería Monterrubio, Ph. D. Iván Adrián García Galicia, Ph. D. Armando Quintero Ramos, y Dr. Eduardo Santellano Estrada.

A los investigadores del cuerpo académico de Tecnología de Productos de Origen Animal quienes hicieron de mi formación de posgrado una aventura agradable y llena de aprendizaje, Ph. D. Francisco Alfredo Núñez González, Dr. José Arturo García Macías, y Dra. América Chávez Martínez. Así mismo a los investigadores de cátedras CONACYT que colaboraron con su experiencia para fortalecer mi investigación Dra. Lorena Luna Rodríguez, Dr. Luis Manuel Carrillo López, y Dr. Raúl Alberto Reyes Villagrana.

A los profesores investigadores que complementaron mi formación, les agradezco sus enseñanzas, experiencias, así como sus exigencias ya que esto ha hecho de mí una mejor profesionista y persona.

Al personal académico y administrativo de la Facultad de Zootecnia y Ecología en especial al personal de la Secretaría de Investigación y Posgrado su disposición y tiempo son un gran apoyo para mí; M. C. Antonio Humberto Chávez Silva, D. Ph. Pablo Fidel Mancilla Flores, D. Ph. Agustín Corral Luna, Mayra Gámez Gallegos, Natalia Paredes, Claudia Ramos, Claudia Silva, y Carlos González Ramírez.

A mis compañeros de posgrado por compartir espacio, tiempo y convivencia haciendo del trabajo diario una experiencia de vida. A mis amigos con quienes aprendí que la vida se disfruta mejor acompañada Claudia Patricia Pérez Camacho, Daniela Orozco Marrufo, Jesica Aquino López, Octavio Martínez, Víctor Manuel Aguilar Soto, y José Guadalupe Pérez Álvarez.

Al Estado grande, Chihuahua, que ha sido mi casa por varios años en donde puedo sentirme segura, libre, ahí donde la sierra muestra su majestuosidad, el clima extremo su inclemencia, en donde la carne asada, la discada y el chile chilaca son una delicia, en el que su gente es valiente, noble, leal, ¡ay! qué bonito es Chihuahua.

DEDICATORIA

A quien si no a ti, formador de mi ser y entender, mi refugio seguro, eterna inspiración el que me sostiene en momentos de debilidad y me da fortaleza, mi padre *Dios*.

A dos seres maravillosos que han guiado con gran sabiduría mi formación humana esa que nunca aprendí fuera de casa, a ti mami *María de la Luz González Meyo* de quien aprendí tenacidad y fuerza en la adversidad, a ti papi *Joaquín Peña Palomares* quien me enseñó el trabajo y la responsabilidad. Son mi mejor ejemplo de constancia y unidad, los amo.

A mis hermanas. *Yanet, Gabriela, Sonia y Jenny* por acompañarme a lo largo de nuestra vida juntas, por hacerme saber que las tengo en todo momento y sin reparo. Su apoyo incondicional en cada proyecto de mi vida ha sido fundamental para lograrlo.

A mis sobrinos. *Paola, Darian, Avril, Pablo y Joaquín* por recibirme siempre con brazos abiertos y una gran sonrisa cada vez que volvía a casa, esto es para ustedes, deseo me permitan colaborar en su vida profesional y personal.

A mis cuñados. *Dorian y Christian* por darme ánimo para continuar y estar ahí cuidando de mi familia.

Para la familia que en algún momento formaré.

CURRICULUM VITAE

La autora nació el 11 de marzo de 1979 en la Ciudad de México.

- | | |
|-----------|---|
| 1996-2002 | Realizó los estudios de Licenciatura en la Universidad Autónoma del Estado de México, en el Centro Académico Universitario Amecameca, obteniendo el Título de Médico Veterinario Zootecnista. |
| 2008-2010 | Realizó los estudios de Maestría en Ciencias en Producción Animal, con área mayor en Ciencia de la Carne, en la Facultad de Zootecnia y Ecología, de la Universidad Autónoma de Chihuahua. |
| 2013-2016 | Estudiante Graduada de la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua del programa Doctor in Philosophia. |

RESUMEN GENERAL

Aplicación de ondas ultrasónicas de alta intensidad en las propiedades de la carne fresca y madurada de bovino

POR:

M. C. Esmeralda Mónica Peña González

Doctor in Philosophia en Producción Animal

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Ph. D. Alma Delia Alarcón Rojo

Con el objetivo de conocer la influencia del ultrasonido en las características fisicoquímicas, de textura y sensoriales de la carne se realizaron dos estudios. En el primero, se aplicó ultrasonido de alta intensidad (40 kHz, 11 W/cm², durante 60 min) al m. *Longissimus dorsi* después de su almacenamiento a 4 °C por 0, 7, y 14 d. En cada tiempo de almacenamiento se evaluó la textura, oxidación de lípidos (OL) y la calidad sensorial. Tanto el ultrasonido como el almacenamiento, disminuyeron el esfuerzo de corte (EC) (P<0.0001) de la carne. La OL aumentó con el ultrasonido a los 14 d de almacenamiento (P<0.0089), sin comprometer la estabilidad oxidativa. La carne ultrasonificada y almacenada durante 14 d se percibió más jugosa y más suave (P<0.0001), comparada con la muestra control. En un segundo estudio se evaluó el efecto del ultrasonido de alta intensidad (40 kHz, 11 W/cm²) sobre las características fisicoquímicas, sensoriales y microestructurales del m. *Longissimus dorsi* de bovino almacenada (4 °C) por 0,

7 y 14 d. El ultrasonido y almacenamiento por 7 d incrementaron el pH, y a los 14 d la carne fue menos roja, con mayor pérdida por goteo y menor esfuerzo de corte ($P<0.05$). La carne ultrasonificada y almacenada por 14 d tuvo un olor intenso a carne fresca, hervida y cocinada ($P<0.05$), con color pálido y café grisáceo. La carne ultrasonificada presentó un sabor metálico y aceitoso, siendo este último más intenso a los 14 d ($P<0.05$). Así mismo, se percibió una textura suave y jugosa en la carne ultrasonificada ($P<0.05$). De estos estudios se concluye que el ultrasonido de alta intensidad no afectó negativamente las variables medidas, por lo que se considera una forma segura para inducir el ablandamiento de la carne de bovino.

ABSTRACT

APPLICATION OF ULTRASONIC WAVES OF HIGH INTENSITY IN THE PROPERTIES OF FRESH AND MATURED BOVINE MEAT

BY:

Esmeralda Mónica Peña González

To study the influence of ultrasound on the physicochemical, texture and sensorial characteristics, two studies were carried out. In the first one, high-intensity ultrasound treatment (40 kHz, 11 W/cm², for 60 min) was applied to m. *Longissimus dorsi* and, after treatment, meat was stored at 4 °C for 0, 7, and 14 d. At each storage time, texture, lipid oxidation (OL) and sensory quality was evaluated. Ultrasound treatment as well as storage time decreased the shear force EC ($P < 0.0001$) of meat. OL increased with ultrasound at 14 d of storage ($P < 0.0089$), without compromising oxidative stability. Meat ultrasonicated and stored for 14 d was perceived to be juicier and softer ($P < 0.0001$) compared to the control sample. In a second study the effect of high-intensity ultrasound (40 kHz, 11 W/cm²) was evaluated on physicochemical, sensory and microstructural properties of bovine m. *Longissimus dorsi* stored (4 °C) at 0, 7 and 14 d. Ultrasound and storage for 7 d increased pH, and at 14 d storage the meat showed low red color, high drip loss and low shear force ($P < 0.05$). Ultrasonicated and 14 d stored meat had a fresh meat, boiled and cooked meat smell ($P < 0.05$) with pale and grayish brown color. Ultrasonicated meat had a metallic taste and oily taste ($P < 0.05$) and the latter was more intense at 14 d storage. A soft and juicy texture was also perceived in sonicated meat ($P < 0.05$).

CONTENIDO

	Página
RESUMEN GENERAL.....	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	xiii
LISTA DE GRÁFICAS.....	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Generalidades del Ultrasonido.....	3
Ultrasonido de Potencia.....	4
Aplicaciones del Ultrasonido de Potencia.....	5
Ultrasonido de Potencia en el Procesamiento y Preservación de los alimentos.....	6
Propiedades Fisicoquímicas de la Carne.....	9
Potencial de hidrógeno (pH).....	10
Capacidad de retención de agua (CRA).....	11
Pérdida por goteo (PG).....	12
Color.....	13
Esfuerzo de corte (EC).....	14
LITERATURA CITADA.....	16
ESTUDIO 1. CALIDAD Y PERFIL SENSORIAL DE CARNE DE BOVINO TRATADA POR ULTRASONIDO.....	20
RESUMEN.....	21
ABSTRACT.....	23
INTRODUCCIÓN.....	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
Preparación de las Muestras de Carne.....	26
Tratamientos.....	26
Medición del Esfuerzo de Corte.....	27
Medición de la Oxidación de Lípidos.....	27

Evaluación Sensorial.....	28
Selección y capacitación de los panelistas.....	28
Prueba Sensorial.....	29
Análisis Estadístico.....	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
Esfuerzo de Corte.....	32
Oxidación de Lípidos.....	35
Propiedades Sensoriales.....	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
LITERATURA CITADA.....	45
ESTUDIO 2. CALIDAD FISICOQUÍMICA, SENSORIAL Y MICROESTRUCTURA DE CARNE DE BOVINO CON ULTRASONIDO Y ALMACENAMIENTO.....	50
RESUMEN.....	51
ABSTRACT.....	53
INTRODUCCIÓN.....	54
MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
Naturaleza de las Muestras y Unidad Experimental.....	56
Tratamientos y Aplicación del Ultrasonido.....	56
Determinación de las Variables Fisicoquímicas.....	57
Medición del pH.....	57
Medición del color.....	57
Medición de la capacidad de retención de agua (CRA)....	57
Medición de la pérdida por goteo (PG).....	58
Determinación de la Textura Instrumental.....	58
Determinación del esfuerzo de corte (EC).....	58
Análisis de perfil de textura (APT).....	59
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	60
Evaluación Sensorial.....	61
Conformación y entrenamiento del panel.....	61
Entrenamiento de los jueces evaluadores.....	61
Prueba sensorial.....	63

Análisis Estadístico.....	64
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
pH.....	65
Color.....	67
Luminosidad (L*).....	67
Tendencia al rojo (a*).....	68
Tendencia al amarillo (b*).....	68
Croma (C*).....	68
Hue (h*).....	73
Capacidad de Retención del Agua (CRA).....	75
Pérdida por Goteo (PG).....	78
Textura Instrumental.....	80
Esfuerzo de corte (EC).....	80
Análisis de perfil de textura (APT).....	83
Microscopía Electrónica (SEM).....	86
Análisis Sensorial.....	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
LITERATURA CITADA.....	101

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Léxico desarrollado (descriptores que caracterizan las muestras de carne) por los panelistas, utilizado en la evaluación del análisis cuantitativo descriptivo (QDA).....	30
2	Definiciones de descriptores desarrollados por los panelistas para caracterizar m. <i>Longissimus dorsi</i> con y sin ultrasonido de alta intensidad y almacenamiento a 4 °C.....	62
3	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el perfil de textura APT de carne de bovino m. <i>Longissimus dorsi</i> con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenamiento a 4 °C por 0, 7 y 14 d (Media ± E. E.).....	85

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica	Página
1 Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la dureza instrumental medida como esfuerzo de corte N (Media $\pm$ E. E.), en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	33
2 Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el índice de oxidación lipídica OL (miligramos MDA/kilogramo de carne; Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	36
3 Descriptores sensoriales (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	38
4 Estimación del coeficiente de los descriptores para la carne bovina m. <i>Longissimus dorsi</i> con la aplicación de ultrasonido a 4 °C durante 0, 7 y 14 d de almacenamiento.....	42
5 Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el pH (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	66
6 Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la Luminosidad L* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	69
7 Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la tendencia al rojo a* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	70
8 Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la tendencia al amarillo b* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C po 0, 7 y 14 d.....	71

9	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la saturación Croma C* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	72
10	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el Tono h* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	74
11	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la capacidad de retención de agua CRA (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	76
12	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la pérdida por goteo PG (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	79
13	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el esfuerzo de corte EC (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	81
14	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en los descriptores del olor (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	90
15	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en los descriptores del color (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	92
16	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en los descriptores del sabor (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	93
17	Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en los descriptores de la textura (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. <i>Longissimus dorsi</i> de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40	

kHz, 11 W/cm ²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d.....	95
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Micrografías (SEM) de carne de bovino m. <i>Longissimus dorsi</i> con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm ²) y 0, 7 y 14 d de almacenamiento a 4 °C.....	87

INTRODUCCIÓN

El ultrasonido tiene un amplio margen de aplicación en el sector de los alimentos. Se le ha considerado una metodología emergente con un gran potencial para mejorar y acelerar los procesos sin dañar la calidad de los alimentos o productos en donde se aplique (Awad *et al.*, 2012). El ultrasonido se compone de ondas sonoras con frecuencias más altas que las perceptibles por el ser humano (Baskaracharya *et al.*, 2009), cuando se ajusta la frecuencia su aplicación es factible en la industria de los alimentos, sobre todo por economía, sencillez y ahorro de energía.

Ésta metodología se emplea con baja potencia (alta frecuencia) para el monitoreo de la composición y propiedades fisicoquímicas de los componentes de alimentos y productos alimenticios durante su proceso (Chemat *et al.*, 2011) y contribuye a controlar propiedades que mejoran la calidad. En los últimos años se han conducido investigaciones para examinar los efectos del ultrasonido en diversas matrices de productos alimenticios; en particular, en carne fresca y procesada, indicando resultados favorables en características fisicoquímicas, procesos de elaboración de los productos cárnicos, contéo microbiológico y características sensoriales (Alarcón-Rojo *et al.*, 2015).

Aunque las ondas de ultrasonido se han aplicado en distintas matrices y procesos con el objetivo de mejorar una amplia variedad de características, sólo un número reducido de procesos ha podido establecer las condiciones para escalarlo a nivel industrial (Gallego-Juárez, 2010). En el sector de los alimentos se ha considerado una herramienta limpia para el desarrollo de los procesos

(Mandour *et al.*, 2010) y en el sector de la carne los resultados no son consistentes debido a la naturaleza propia de la carne.

En este sentido ésta investigación aquí presentada se realiza con el objetivo de conocer los efectos del ultrasonido en las características fisicoquímicas, de textura y sensoriales en carne fresca.

Es importante considerar que hasta ahora las investigaciones de los efectos del ultrasonido en la carne y productos cárnicos se han desarrollado a nivel de laboratorio y se tiene un conocimiento de la metodología que permitiría iniciar la implementación en la industria de forma exploratoria en cortes al detalle e incluso en algunos cortes primarios.

REVISIÓN DE LITERATURA

En la naturaleza algunas especies animales como los murciélagos utilizan los pulsos de ultrasonido de baja intensidad para ayudarse a localizar a sus presas, mientras que ciertas especies marinas emplean impulsos de alta intensidad para aturdir a sus víctimas antes de la captura (Patist y Bates, 2008). El ultrasonido se ha utilizado para diversos propósitos y áreas que incluyen la comunicación con los animales mediante silbatos para perros, detección de fallas en la construcción de edificios de concreto, síntesis de productos químicos y el tratamiento de las enfermedades (Dolatowski *et al.*, 2007).

Generalidades del Ultrasonido

Se clasifica en dos grupos, los de baja intensidad que utilizan potencia tan pequeña que las ondas ultrasónicas formadas no causan alteraciones físicas o químicas en las propiedades del material en donde se aplica y es considerado no destructivo (Jayasooriya *et al.*, 2004).

El ultrasonido de baja intensidad en la industria alimentaria es utilizado como una técnica analítica para proporcionar información sobre propiedades físico-químicas de los alimentos tales como la composición, estructura, estado físico por mencionar algunas (Demirdöven y Baysal, 2009), además tiene la característica de no ser invasivo, destructivo, las mediciones son rápidas automatizadas y pueden llevarse a cabo en laboratorios o en la línea de trabajo, esto le confiere ventajas sobre otras técnicas analíticas tradicionales.

El otro grupo es de alta potencia o también conocido como de alta intensidad ya que emplea intensidades superiores a 1 W/cm^2 en las frecuencias

entre 20-100 kHz (Mc Clements *et al.*, 1995). En este rango de ondas ultrasónicas el material puede sufrir alteraciones en sus propiedades físicas, químicas o mecánicas.

La alta intensidad ultrasónica se ha empleado para generar emulsiones, romper las células y dispersar materiales que son agregados. Se han identificado diversas áreas en las que se puede emplear con mayor potencial para desarrollarlo a futuro como son la modificación y control de procesos de cristalización, desgasificación de alimentos líquidos, inactivación de enzimas, secado, filtración e inducción de la oxidación (Knorr *et al.*, 2004)

Ultrasonido de Potencia

El ultrasonido de alta intensidad surge como una nueva tecnología complementaria con gran potencial de aplicación y es parte de las llamadas tecnologías emergentes, como respuesta a las exigencias de los consumidores por productos mínimamente procesados, que mantengan sus características originales y sean inocuos (Chemat *et al.*, 2011; Cárcel *et al.*, 2012). La intensidad del ultrasonido se mide en términos de potencia, estos pueden ser de baja intensidad (1 W/cm^2 , 1 MHz) o de alta intensidad ($10\text{-}1000 \text{ W/cm}^2$, 20 kHz).

Los efectos son principalmente mecánicos produciéndose ciclos de expansión y compresión de forma alterna, provocando el crecimiento de burbujas existentes en el medio o la formación de nuevas (Chemat *et al.*, 2011). Cuando alcanzan un volumen al que ya no pueden absorber más energía, implosionan violentamente provocando microcorrientes y el colapso de las moléculas del líquido, es conocido como cavitación.

La cantidad de energía liberada por la cavitación depende de la cinética del crecimiento de la burbuja y el colapso de la misma, esta energía aumenta con el incremento de la tensión superficial en la interfase de la burbuja y disminuye con el aumento de la presión de vapor del líquido (Cárcel *et al.*, 2007). El resultado del ultrasonido en medios líquidos depende de variables como las características del medio de tratamiento, (viscosidad, tensión superficial, presión de vapor, naturaleza y concentración de gas disuelto, presencia de partículas sólidas y temperatura), rendimiento del generador del ultrasonido (frecuencia, potencia de entrada), tamaño y la geometría del recipiente de tratamiento (Siró *et al.*, 2009; Cárcel *et al.*, 2012).

Aplicaciones del Ultrasonido de Potencia

La aplicación del ultrasonido de potencia se efectúa en diversas áreas del conocimiento, en medicina ofrece múltiples posibilidades para el diagnóstico de la salud brindando información incluso en tiempo real (Mc Clements, 1995) en el área de la física mediante el estudio de propiedades de líquidos y gases y en la navegación aérea y marítima.

Otras aplicaciones técnicas del ultrasonido se extienden en; el lavado de textiles, la soldadura de plásticos, ruptura de espuma (desespumante), humos industriales, limpieza y descontaminación de superficies de difícil acceso, la deshidratación de frutas y vegetales, en la industria de las bebidas se emplea en la inhibición de enzimas, la inactivación microbiana (conservación) y otras aplicaciones incluyen cristalización de grasas y azúcares (Cárcel *et al.*, 2007).

En la industria alimentaria es una tecnología analítica que ayuda en la

caracterización de las materias empleadas en los alimentos y controlar las propiedades de los alimentos durante su procesamiento, por lo que su instrumentación puede ser completamente automatizada permitiendo hacer mediciones rápidas y precisas (Dolatowski *et al.*, 2007). Uno de los usos iniciales se llevó a cabo en el área bioquímica en el rompimiento de las paredes celulares biológicas para liberar el contenido, posteriormente se demostró que el ultrasonido de potencia se puede utilizar para activar las enzimas inmovilizadas mediante el aumento del transporte de sustrato a la enzima (Knorr *et al.*, 2004).

Ultrasonido de Potencia en el Procesamiento y Preservación de los Alimentos

Las técnicas ultrasónicas están siendo cada vez más populares en la industria del procesamiento y preservación de alimentos, para controlar un proceso o producto. El ultrasonido de potencia se puede utilizar para activar las enzimas inmovilizadas mediante el aumento del transporte de sustrato a la enzima o como un método de inhibición (Jayasoriya *et al.*, 2004).

Otro ejemplo de aplicación es el secado acústico el cual pueden llevarse a cabo a temperaturas más bajas que las empleadas en la metodología convencional debido a que la transferencia de calor entre una superficie sólida y una líquida se incrementa en rango aproximadamente entre un 30-60 %, reduciendo la probabilidad de oxidación o degradación en el material (Siró *et al.*, 2009).

La ecografía ha demostrado ser un método eficaz para ayudar a la congelación de alimentos, con amplios beneficios debidos a la aceleración del

proceso de nucleación de hielo y la congelación, con el fin de controlar la distribución del tamaño del cristal en los productos congelados (Dolatowski *et al.*, 2007). Si se aplica al proceso de congelación de productos frescos, el ultrasonido no sólo puede aumentar la velocidad de congelación, sino también mejorar la calidad de los productos.

Las técnicas más comunes que se utilizan actualmente para inactivar microorganismos en los productos alimenticios son la pasteurización y la esterilización térmica convencional. Cuyo tratamiento térmico destruye los microorganismos vegetativos y algunas esporas. Sin embargo, su eficacia depende de la temperatura y tiempo de tratamiento. La magnitud de tratamiento, el tiempo y la temperatura del proceso es también proporcional a la cantidad de la pérdida de nutrientes, el desarrollo de sabores indeseables y deterioro de las propiedades funcionales de los productos alimenticios (Mason *et al.*, 1996; Songül y Cigdem, 2013).

Se ha reportado que el ultrasonido de alta potencia reduce sustancialmente la carga microbiana por su efecto de cavitación sobre las paredes celulares biológicas, dando lugar a la destrucción de células vivas y contribuyendo a la preservación de los alimentos (Knorr *et al.*, 2004), desafortunadamente poco se conoce acerca del mecanismo de inactivación. Caraveo *et al.* (2013) señalaron que el tratamiento con ultrasonido de potencia en carne fresca de res, disminuyó la carga bacteriana, particularmente en coliformes y bacterias psicrófilas cuando se aplicó a una frecuencia de 40 kHz y 60 W/cm² de intensidad. Utilizando como medio de difusión agua tridestilada en

dos tiempos 60 y 90 min, siendo este último el tiempo que mostró mayor disminución de microorganismos durante el almacenamiento de la carne.

El uso del ultrasonido en el área cárnica tiene sus inicios en la predicción de grasa y músculos del ganado en pie que se lleva a cabo desde los años 50's. Hoy día la ecografía se utiliza de forma rutinaria en la predicción de la calidad, el sabor y en uno de los atributos de calidad más importantes para la satisfacción del consumidor, la terneza. Siendo esta una característica de calidad que ha sido difícil de alcanzar por la influencia de dos de los principales componentes de la carne el músculo esquelético y el tejido conjuntivo (Jayasooriya *et al.*, 2007).

La conversión de músculo a carne se basa en un proceso bioquímico dado por las proteasas endógenas. Sin embargo, esto consume tiempo y es variable entre los animales, por lo que, para conseguir esta característica se han empleado diversos métodos físicos como; la estimulación eléctrica, métodos mecánicos y químicos. El uso del ultrasonido puede causar una interrupción física a través de mecanismos como la cavitación, provocando cambios físicos y químicos en la carne al inducir la interrupción de las membranas celulares y debilitando físicamente la estructura muscular. Indirectamente, puede inducir la conversión por la activación de la proteólisis por la liberación de las catepsinas del lisosoma y/o los iones calcio intracelulares que activan a las calpainas. Sin embargo, los resultados obtenidos en las investigaciones no son consistentes (Dolatowski *et al.*, 2004; Jayasooriya *et al.*, 2004).

En el marinado de la carne existen dos formas de empleo de sal la forma seca y la húmeda. Esta última recientemente se ha combinado con la asistencia

del ultrasonido de alta intensidad, los efectos en la difusión de sal reportados en la literatura son favorables. Hai-Jun *et al.* (2009) señalaron el efecto del ultrasonido en características fisicoquímicas y el colágeno del músculo *Semitendinosus* de res. Los resultados sugieren que el ultrasonido tuvo efecto en la desnaturalización y agregación de fibras de colágeno al espacio extracelular. Estos cambios contribuyeron en las propiedades de calidad y textura de la carne, sin embargo, los parámetros de luminosidad y tendencia al rojo no fueron afectados.

En un estudio realizado por Cárcel *et al.* (2007) se reportó que la influencia del ultrasonido de potencia en la transferencia de masa durante el marinado de carne de cerdo depende de la intensidad aplicada a las muestras. El ultrasonido produce la formación de burbujas que golpean el sólido, esto puede producir una microinyección de la salmuera en la muestra lo que podría explicar el incremento de Na-Cl en la carne.

Por su parte, Siró *et al.* (2009) reportaron resultados similares al indicar que tanto la aplicación de ultrasonido (baja intensidad y baja frecuencia) como el uso del vacío ocasionaron cambios microestructurales favorables en las muestras de lomo de cerdo marinado con cloruro de sodio. Sin embargo, estos efectos fueron altamente dependientes de la intensidad de ultrasonido que se aplicó.

Se deben considerar algunos factores críticos de procesamiento en alimentos ya que, el ultrasonido genera un rápido cambio en la temperatura y aumento de la presión (109 °C/s) en periodos de tiempo cortos. Además, se

produce el fenómeno de cavitación en donde las ondas de choque contribuyen al efecto. El tiempo de exposición, volumen a procesar y la composición de la materia son factores que pueden variar los efectos de la aplicación del ultrasonido (Knorr *et al.*, 2004; Cárcel *et al.*, 2007).

Propiedades Fisicoquímicas de la Carne

Las propiedades fisicoquímicas son los principales parámetros de calidad evaluados 24 h *post mortem* en la carne (Lawrie y Ledward, 2006). El potencial de hidrógeno (pH), la capacidad de retención de agua (CRA), la pérdida por goteo (PG), el color (L^* , a^* , b^* , C^* y h^*) y el esfuerzo de corte (EC) son indicadores de la calidad de la materia prima cárnica.

La evaluación de las características fisicoquímicas se realiza como herramienta de control de calidad, para evaluar la eficiencia de la producción y procesamiento de los tratamientos, para comparar resultados entre laboratorios y como herramienta de investigación (Honikel, 1998; Pardo *et al.*, 2006). Diversos factores o su interacción modifican estas propiedades, la alimentación, raza, aspectos productivos como: genética, manejo y sacrificio entre otros cuya influencia en ciertos atributos de calidad debe considerarse (García-Rey *et al.*, 2004).

Potencial hidrógeno (pH). Uno de los más importantes indicadores de la calidad de la carne cruda es el pH, ya que afecta directamente la estabilidad y propiedades de las proteínas. De su valor final o pH último (pHu), como se reporta en la literatura, dependerán todos los atributos de calidad del producto. Dentro de los más importantes se encuentran la capacidad de retención de agua, la

pérdida por goteo y el color (Huff-Lonengan y Lonengan, 2005). Es un parámetro de gran influencia sobre la funcionalidad de las proteínas del músculo, sus cambios repercuten en la disminución de la capacidad de retención de agua conllevando a pérdidas económicas.

El pH se analiza en diversos estudios y condiciones, Got *et al.* (1999) indicaron que el pH inicial de la carne (m. *Semimembranoso*) incrementó al aplicar el tratamiento ultrasónico (2.6 MHz, 10 W/cm²) previo al *rigor mortis* sin diferencias en el pH final. Otros estudios no encontraron diferencias en el pH por influencia del ultrasonido (Dolatowski *et al.*, 2000, Stadnik, 2008; Jayasooriya *et al.*, 2007; Stadnik y Dolatowski, 2011).

Capacidad de retención de agua (CRA). La capacidad de retención de agua (WHC, por sus siglas en inglés, *Water Holding Capacity*) puede definirse como la habilidad que poseen las proteínas de la carne o músculo para retener y/o inmovilizar firmemente su propia agua, o la añadida, durante la aplicación de cualquier fuerza (Pardo *et al.*, 2006).

El descenso de pH provoca un encogimiento de la red de cadenas polipeptídicas que conlleva a una disminución de la carne a retener agua, el poder de retención de agua está directamente relacionado al pHu (Pardo *et al.*, 2006). La velocidad a la que el pHu se estabilice tiene también influencia. Cuando la caída de pH es más rápida, las alteraciones sufridas en las proteínas miofibrilares y sarcoplasmáticas resultan en una disminución en la capacidad de retención de agua (Huff-Lonergan y Lonergan, 2005). En la carne tratada con el ultrasonido los resultados muestran el aumento en las tasas de exudado de la carne y de

pérdida de agua (Chang *et al.*, 2015). Sin embargo, Jayasooriya *et al.*, 2007 no mencionaron cambios en la pérdida por goteo (24 kHz, 12 W/cm²), así mismo, Smith (2011) mencionó que no hay efecto sobre la capacidad de retención de agua. En contraste, otros autores reportaron mayor capacidad de retención de agua después del tratamiento ultrasónico (Pohlman *et al.*, 1997; Dolatowski *et al.*, 2007; Stadnik, 2008), con valores similares a una carne en etapa avanzada *post mortem* lo que sugirió un incremento en la tasa de maduración por influencia del ultrasonido en cambios estructurales de las proteínas miofibrilares (Stadnik, 2008). Además, se reporta la degradación de proteínas con un peso molecular superior a 20-25 kDa; un incremento en la disponibilidad del sistema calpaína y de los contenidos lisosomales, lo que sugiere un efecto en la terneza. (Jayasooriya *et al.*, 2007).

Pérdida por goteo (PG). La liberación de gotas desde el músculo proviene del agua extracelular que es la más fácil de extraer y es conocida como pérdida por goteo y se ha considerado dependiente del estado de contracción después de la instauración del *rigor mortis* debido a la reducción del espacio filamental, cambios en la membrana celular que liberan agua al espacio extracelular siendo eliminado en gotas através de las superficies de corte (Honikel *et al.*, 1998). La pérdida por goteo esta estrechamente relacionada con el pH, la CRA y se considera que cuando la CRA incrementa la PG disminuye y visceversa (Lawrie, 1998). Diversas causas ocasionan un aumento de la CRA durante la maduración de la carne, el pH, la desintegración de las líneas Z por acción de las proteasas y cambios en la permeabilidad de las membranas con

difusión y redistribución iónica que da como resultado la sustitución de iones divalentes y debilitamiento de fuerzas de la proximidad de las cadenas protéicas. El goteo es un problema sobre todo económico, primero para el comercializador por la pérdida de peso en el corte, provocando una acumulación de líquido alrededor de éste y como consecuencia un rechazo por parte del consumidor (Melody *et al.*, 2004).

Los reportes de investigaciones mencionan que el ultrasonido aumenta la tasa de exudado en la carne y en consecuencia la pérdida de agua (Chang *et al.*, 2015). Por el contrario, Jayasooriya *et al.*, 2007 no reporta cambios en la pérdida por goteo cuando se aplica ultrasonido (24 kHz, 12 W/cm²). Así mismo, Smith (2011) explicó que el ultrasonido no tuvo efecto sobre la CRA por ende la PG no se afectó.

Color. El color es un parámetro importante en la calidad de la carne, debido a que es la primera característica sensorial apreciada por el consumidor (O'Sullivan *et al.*, 2003a). En carnes rojas, un color rojo brillante está relacionado con frescura y de esto depende su rechazo o aceptación por el consumidor (O'Sullivan *et al.*, 2003b; Pardo *et al.*, 2006). El aspecto exterior de la carne puede asociarse con el tiempo de almacenamiento, la vida útil, la dureza y la jugosidad. Algunas investigaciones sugieren que el ultrasonido no tiene efecto sobre el color de la carne atribuyendo estos resultados, a que el calor generado no es suficiente para desnaturalizar las proteínas y pigmentos (Jayasooriya *et al.*, 2007; Stadnik y Dolatowski 2011; Sikes *et al.*, 2014). Por el contrario, Pohlman *et al.* (1997) al investigar el efecto del ultrasonido (22 W/cm²) en carne señalan

cambios a un color más claro, menos rojo, más amarillo y más naranja (mayor ángulo de tono); menos brillante con respecto a el control. Stadnik y Dolatowski, (2011) observaron también que el ultrasonido acelera el cambio total de color, limita la formación de MbO₂ y ralentiza la formación de MetMb.

Esfuerzo de corte (EC). La textura de los alimentos se determina principalmente por el contenido de agua, grasa y por los tipos y proporciones relativas de algunas proteínas y carbohidratos estructurales (Partida *et al.*, 2007). Los cambios en la textura se producen por la pérdida de agua o grasa, la formación o ruptura de las emulsiones, la hidrólisis de los carbohidratos poliméricos y la coagulación o hidrólisis de las proteínas (Melody *et al.*, 2004).

La textura es una de las características más apreciadas por el consumidor, ésta depende del tamaño de los haces de fibras dispuestos longitudinalmente en el músculo y delimitados por los septos del tejido conjuntivo que constituye el perimio (Pardo *et al.*, 2006). Se ha sugerido que la cavitación acústica induce la ruptura mecánica de la estructura de proteínas miofibrilares (Stadnik, 2008), fragmenta las macromoléculas de colágeno y la migración de proteínas, minerales y otros compuestos por ende la aceleración de la proteólisis o desnaturalización de las proteínas (Siró *et al.*, 2009).

Es posible que después de la aplicación de ultrasonido se modifique la cantidad de ATP disponible en el músculo en etapa *pre rigor* (Sikes *et al.*, 2014), se acelere el inicio del *rigor mortis* (Dolatowski y Twarda, 2004; Stadnik y Dolatowski, 2011) e incremente la tasa de maduración de la carne (Chandrapala, 2015).

Se ha explorado la aplicación del ultrasonido para incrementar la terneza de la carne (Jayasooriya *et al.*, 2007; Stadnik y Dolatowski, 2011; Chang *et al.*, 2015) y disminuir el periodo de maduración, sin comprometer otros parámetros de calidad (Dolatowski *et al.*, 2007; Stadnik, 2008). El potencial de aplicación del ultrasonido de baja frecuencia y baja intensidad en el ablandamiento de la carne tiene relevancia, diversos estudios reportan efecto significativo del ultrasonido sobre la disminución de la fuerza de corte (Stadnik y Dolatowski, 2011; Zhou *et al.*, 2010). Existen reportes de sus beneficios en carne de bovino en el músculo *Longissimus lumborum* y *Semitendinosus* (24 kHz y 12 W/cm² por 240 s; Jayasooriya *et al.*, 2007), en m. *Semimembranosus* (45 kHz y 2 W/cm² por 2 min; Stadnik y Dolatowski, 2011) y en el m. *Semitendinosus* 40 kHz, 1500 W por 10, 20, 30, 40, 50 o 60 min (Chang *et al.*, 2015). En carne de ave también existen estudios con beneficios sobre textura (24 kHz, 12 W/cm² por 4 min después de 7 d de almacenamiento; Xiong *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2014) así como en carne de cerdo (2.5 a 3 W/cm² por 180 min; Siró *et al.*, 2009). Otros estudios indicaron que no existe efecto sobre la fuerza de corte al aplicar el ultrasonido a 62 W/cm² (Lyng *et al.*, 1997), 22 W/cm² (Pohlman *et al.*, 1997) y 4-19 W/cm² (McDonnell *et al.*, 2014).

LITERATURA CITADA

- Alarcón-Rojo, A. D., H. Janacua, J. C. Rodríguez, L. Paniwnyk y T. J. Mason. 2015. Power ultrasound in meat processing meat. *Meat Sci.* 107:86-93.
- Awad, T. S., H. A. Moharram, O. E. Shaltout, D. Asker y M. M. Youssef. 2012. Application of ultrasound in analysis, processing and quality control of food. A review. *Food Res. Int.* 48:410-427.
- Baskaracharya, R. K., S. Kentish y M. Ashokkumar. 2009. Selected applications of ultrasonics in food processing. *Food Eng. Rev.* 1:31-49.
- Caraveo, O., A. D. Alarcón-Rojo, A. Renteria, E. Santellano y L. Paniwnyk. 2015. Physicochemical and microbiological characteristics of beef treated with high-intensity ultrasound and stored 4 °C. *J. Sci. Food Agr.* 95:2487-2493.
- Cárcel, J. A., J. Benedito, J. Bon, y A. Muller. 2007. High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Sci.* 76:611-619.
- Cárcel, J. A., J. V. García-Pérez, J. Benedito, y A. Muller. 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *J. Food Eng.* 110:200-207.
- Chandrapala, J. 2015. Low intensity ultrasound applications on foods systems. *J. Int. Food Res.* 22:888-895.
- Chang H. J, Q. Wang, C. H. Tang, y G. H. Zhou. 2015. Effects of ultrasound treatment on connective tissue collagen and meat quality of beef semitendinosus muscle. *J. Food Qual.* 38:256–267.
- Chemat, F., Zill-e-Ituma, y M. K. Khan. 2011. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrason Sonochem.* 18:813-835.
- Demirdöven, A., y T. Baysal. 2009. The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Rev. Int.* 25:1-11.
- Dolatowski, Z. J., J. Twarda y M. Dudek. 2004. Changes in hydration of meat during the ageing process. *Annales UMCS, Sec. E.* 59: 1595-1606.
- Dolatowski, Z., D. M., Stasiak y A. Latoch. 2000. Effect of ultrasound processing of meat before freezing on its texture after thawing. *Electr J. Polish Agric. Univer*, 3(2).
- Dolatowski, Z. J., J. Stadnik, y D. Stasiak. 2007. Applications of ultrasound in food technology. *Acta Sci. Pol., Technol. Aliment.* 6(3):89-99.

- Gallego-Juárez, J. A. 2010. High-power ultrasonic processing: recent development and prospective advances. *Physics Procedia*. 3:35-47.
- García-Rey, R. M., R. Quiles-Zafra, y M. D. Luque de Castro. 2004. Efecto de la alimentación en las características de la canal y de la grasa de cerdo blanco. *Eurocarne*. 129:49-58.
- Got, F., J. Culioli, P. Berge, X. Vignon, T. Astruc, J. M. Quideau y M. Lethiecq. 1999. Effects of high-intensity high-frequency ultrasound on ageing rate, ultrastructure and some physico-chemical properties of beef. *Meat Sci*. 51:35-42.
- Hai-Jun, Ch., X. Xing-Lian, Z. Guang-Hong, L. Chun Bao, y M. Huang. 2009. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef semitendinosus muscle during ultrasonic processing. *Food Bioprocess Technol*. 5:285-297.
- Honikel, K. O. 1998. Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat. *Meat Sci*. 49:447-457.
- Huff-Lonergan, E., y S. M. Lonergan. 2005. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of *post mortem* biochemical and structural changes. *Meat Sci*. 71:194-204.
- Jayasooriya, S. D., B. R. Bhandari, P. Torley, y B. R. D'Arcy. 2004. Effect of high power ultrasound wave son properties of meat: A review. *Int. J. Food Prop*. 7:301-319.
- Jayasooriya, S. D., P. J. Torley, B. R. D'Arcy y B. R. Bhandari. 2007. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine Semitendinosus and Longissimus muscle. *Meat Sci*. 75. 628-639.
- Knorr, D., M. Zenker, V. Heinz, y L. Dong-Un. 2004. Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends Food Sci. Tech*. 15:261-266.
- Lawrie R. A. 1998. *Ciencia de la carne* (4th ed.). Acribia, Zaragoza España.
- Lawrie R. A. y Ledward, D. A. 2006. *Lawries's Meat Science* (7th ed.). CRC/Woodhead Publishing, Cambridge.
- Lyng, J. G., P. Allen y B. McKenna. 1998. The effects of pre and post rigor high intensity ultrasound treatment on aspects of lamb tenderness. *Lebensm Wiss. U. Technol*. 31:334-338.

- Mandour, H. A., M. Bashari, C. Lagnika, Q. He y X. Sun. 2010. Effect of ultrasound treatment prior to vacuum and modified atmosphere packaging on microbial and physical characteristics of fresh beef. *J. Food Nutr. Res.* 6:312-320.
- Mason, T.J., L. Paniwnyk y J. P. Lorimer. 1996. The uses of ultrasound in food technology. *Ultrason Sonochem.* 3:S253-S260.
- Mc Clements, D. J. 1995. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends Food Sci. Tech.* 6:293-299.
- McDonnell, C. K., J. G. Lyng y P. Allen. 2014. The use of power ultrasound for accelerating the curing of pork. *Meat Sci.* 98:142-149.
- Melody, J. L., S. M. Lonergan, L. J. Rowe, T. W. Huiatt, M. S. Mayes y E. Huff-Lonergan. 2004. Early postmortem biochemical factors influence tenderness and water-holding capacity of three porcine muscles. *J. Anim. Sci.* 82:1195-1205.
- O'Sullivan, M. G., D. V. Byrne, H. Martens, L. H. Gidskehaug, H. J. Andersen y M. Martens. 2003 b. Evaluation of pork colour: prediction of visual sensory quality of meat from instrumental and computer vision methods of colour analysis. *Meat Sci.* 65:909-918.
- O'Sullivan, M. G., D. V. Byrne, y M. Martens. 2003 a. Evaluation of pork colour: sensory colour assessment using trained and untrained sensory panellists. *Meat Sci.* 63:119-129.
- Pardo, J. E., L. Tarjuelo, B. Mateos, J. Hurtado, y A. Alvaruiz. 2006. Parámetros a evaluar en el control de la calidad de las carnes. *Eurocarne.* 152:19-34.
- Partida, J. A., J. L. Olleta, C. Sañudo, P. Albertí y M. M. Campo. 2007. Fatty acid composition and sensory traits of beef fed palm oil supplements. *Meat Sci.* 76:444-454.
- Patist, A., y D. Bates. 2008. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innov. Food Sci. Emerg.* 9:147-154.
- Pohlman, F. W., M. E. Dikeman y D. H. Kropf. 1997. Effects of high intensity ultrasound treatment, storage time and cooking method on shear, sensory, instrumental color and cooking properties of packaged and unpackaged beef pectoralis Muscle. *Meat Sci.* 46:89-100.

- Sikes, A. L., R. Mawson, J. Stark y R. Warner. 2014. Quality properties of pre- and post-rigor beef muscle after interventions with high frequency ultrasound. *Ultrason Sonochem.* 21:2138-2143.
- Siró, I., Cs. Vén, Cs. Ballar, G. Jónas, I. Zeke, y L. Friedrich. 2009. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. *J. Food Eng.* 91:353-362.
- Smith, D. P. 2011. Effect of ultrasonic marination on broiler breast meat quality and salmonella contamination. *Int. J. Poult Sci.* 10:757-759.
- Songül, Ş. E. y S. Çiğdem. 2013. Use of ultrasound in food preservation. *Natural Sci.* 5:5-13.
- Stadnik, J. 2008. Influence of sonication on the oxidative stability of beef. *Roczniki Instytutu Przemysłu Miesnego I Tluszczowego*, 47:63-68.
- Stadnik, J. y Z. J. Dolatowski. 2011. Influence of sonication on warner-bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (m. semimembranosus). *Eur. Food Res. Tech.* 233: 553-559.
- Xiong, G. Y., L. H. Zhang, W. Zhang y J. Wlu. 2012. Influence of ultrasound and proteolytic enzyme inhibitors on muscle degradation tenderness and cooking loss of hens during aging. *Czech. J. Food Sci.* 30:195-205.
- Zhou, G. H., X. L. Xu y L. Liu. 2010. Preservation technologies for fresh meat a review. *Meat Sci.* 86:119-128.

**ESTUDIO 1. CALIDAD Y PERFIL SENSORIAL DE CARNE DE BOVINO
TRATADA POR ULTRASONIDO**

RESUMEN

CALIDAD Y PERFIL SENSORIAL DE LA CARNE DE BOVINO TRATADA POR ULTRASONIDO

POR:

M. C. Esmeralda Mónica Peña González

Doctor in Philosophia en Producción Animal

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Ph. D. Alma Delia Alarcón Rojo

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de ultrasonido de alta intensidad en la textura, la oxidación de lípidos y la calidad sensorial de la carne de bovino. La aplicación de ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) se realizó a muestras m. *Longissimus dorsi* de bovino, durante 60 min. Las muestras control y las muestras ultrasonificadas se almacenaron a 4 °C y se evaluaron a 0, 7, y 14 d. Se determinó el esfuerzo de corte (EC), la oxidación de lípidos (OL) y el análisis sensorial descriptivo. El EC disminuyó con el almacenamiento ($P < 0,0001$) y fue menor en las muestras tratadas por ecografía (2.68 N) que en la carne control (3.75 N). A los 14 d de almacenamiento, la OL de las muestras tratadas con ultrasonido había aumentado (0.11) ($P < 0,0089$), sin comprometer la estabilidad oxidativa. La carne tratada almacenada durante 14 d tuvo un ligero sabor indeseable, pero fue más jugosa y más suave ($P < 0,0001$), en comparación con la carne de la muestra control almacenada el mismo periodo. La aplicación de

ultrasonido de alta intensidad reduce el EC en la carne de bovino, aumentó la OL sin afectar a la percepción humana, por tanto, no afecta drásticamente otras características sensoriales.

ABSTRAC

QUALITY AND SENSORY PROFILE OF ULTRASOUND TREATED BEEF

BY:

Esmeralda Mónica Peña González

The effects of high-intensity ultrasound application on beef (m. *Longissimus dorsi*) quality and sensory attributes were evaluated. Ultrasound application (40 kHz, 11 W/cm²) was applied for 60 min on samples. Control and ultrasound-treated samples were stored at 4 °C and evaluated at 0, 7, 14 days. After 14 days of storage, lipid oxidation of the ultrasound applied sample had increased ($P < 0.0089$), shear force decreased ($P < 0.0001$), and the treated meat was perceived as more tender and juicy. The application of ultrasound increased perception of tenderness without changing other sensory attributes.

INTRODUCCIÓN

Los atributos sensoriales son factores de calidad importantes en la industria de la carne y son responsables de la elección de compra de la carne por parte de los consumidores (Mandour *et al.*, 2014). Por esta razón, se necesitan métodos para garantizar la seguridad, nutrición y las cualidades sensoriales de la carne.

Se han explorado diversas alternativas de procesamiento mínimo para permitir la conservación de la carne, incluyendo nuevas herramientas de procesamiento térmico y no térmico que han tenido éxito al aplicarse en toda la cadena de suministro de alimentos, sin afectar las propiedades funcionales y sensoriales de la carne y productos cárnicos frescos (Demirdöven y Baysal, 2009).

El uso de la tecnología de ultrasonido en el procesamiento de la carne es emergente, innovadora y versátil (Gallego-Juárez, 2010; Chemat *et al.*, 2011). El ultrasonido es una energía acústica, y se considera mecánica, no ionizante y no contaminante (Ünver, 2016), con gran potencial para uso en procesos de producción de alimentos de alta calidad. La ecografía modifica las propiedades físicas, químicas y funcionales (Terefe *et al.*, 2016) de productos alimenticios. Por tanto, puede influir en la calidad de los diversos sistemas alimentarios (Kentish y Feng, 2014).

El ultrasonido se ha utilizado para evaluar la composición de carne, pescado y productos avícolas, a través del análisis de la calidad de los alimentos (Knorr *et al.*, 2004). También ha sido reportado como exitoso en los procesos de

transferencia de masa (Cárcel *et al.*, 2007), marinado, ablandamiento e inactivación de microorganismos (Ünver, 2016). El ultrasonido es una alternativa a los métodos tradicionales de maduración de la carne para ablandarla y mejorar su calidad. La exposición a ultrasonido de alta intensidad puede inducir sensibilidad debido a efectos de cavitación que debilitan la estructura celular, liberan lisosomas y proteasas y provoca la desnaturalización de proteínas (Siró *et al.*, 2009).

Con tratamiento de ultrasonido el tejido muscular puede debilitarse para aumentar la sensibilidad de la carne a cambios fisicoquímicos (Stadnik y Dolatowski, 2011; Hai-Jun *et al.*, 2012). El periodo de maduración también puede reducirse a la vez que se preservan los parámetros de calidad (Dolatowski *et al.*, 2007). Además, que las propiedades tecnológicas del músculo se pueden mejorar sin comprometer la estabilidad oxidativa (Stadnik, 2008). Sin embargo, éste método debe ser desarrollado antes de ser considerado para uso generalizado en la industria.

Hasta la fecha, ningún estudio ha examinado los cambios en las propiedades sensoriales de la carne fresca o madurada causada por el tratamiento de ultrasonido de alta intensidad. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos del tratamiento de ultrasonido de alta intensidad sobre la calidad sensorial, la textura y la oxidación lipídica (LO) de la carne de bovino almacenada a 4 °C.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de las Muestras de Carne

La carne utilizada para los experimentos fue de m. *Longissimus dorsi* de bovino (animales comerciales de la raza Hereford) obtenidos de un proveedor local a los dos d *post mortem*. Los músculos se almacenaron al vacío a 4 °C durante 24 h antes del experimento. El rango de pH de la carne fue de 5.6-5.9. La grasa visible de cada músculo se retiró manualmente antes del experimento. Las muestras fueron cortadas en rebanadas de peso y tamaño similar (130 x 90 x 25 mm de longitud x anchura x altura). La ubicación de las muestras dentro del músculo se aleatorizó con respecto a los tratamientos y se utilizó un nuevo músculo para cada replica experimental (muestras destructivas) con 12 repeticiones por tratamiento.

Tratamientos

Las muestras fueron designadas como control carne no tratada con ultrasonido (C); o tratadas con ultrasonido (U). Todas fueron almacenadas durante 0, 7 y 14 d a 4 °C. De esta manera los tratamientos fueron identificados como C0, C7, C14 y U0, U7, U14 de acuerdo a su aplicación o no de ultrasonido y al tiempo de almacenamiento. Se aplicó ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) a las muestras U al final de cada periodo de almacenamiento, durante 60 minutos (30 min por lado) en un baño ultrasónico modificado (Branson® 1510 modelo 1510R-MTH, Branson Ultrasonic Corporation, Danbury, CT, EE. UU.). Se usó agua destilada como medio de difusión. La potencia efectiva del sistema de ultrasonido se determinó utilizando una técnica calorimetría descrita anteriormente (Margulis

y Margulis, 2003). La temperatura del agua destilada del baño ultrasónico se mantuvo constante a 4 °C. Después del periodo de almacenamiento las muestras (C y U) fueron preparadas para el análisis correspondiente.

Medición del Esfuerzo de Corte

El esfuerzo de corte (EC) se midió usando el método descrito por Maher *et al.* (2004). Las muestras se colocaron en bolsas herméticas y se cocieron en un baño de agua (90 °C. Isotemp 215: Fisher Scientific, Pittsburgh, PA, EE. UU.). Cuando se alcanzó una temperatura de 72 °C en el centro geométrico de la muestra, se retiró del baño, se drenó y dejó templar a temperatura ambiente, almacenándose en refrigeración (4 °C) durante la noche. Después de 24 h, se cortaron cilindros de 1 cm de diámetro paralelos a las fibras. El esfuerzo de corte se midió usando un texturómetro TA/TX2i (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido), adaptado con una cuchilla Warner Bratzler a una velocidad de cruceta de 200 mm/min⁻¹. Los valores promedio de 8 réplicas se analizaron para cada tratamiento y los valores de esfuerzo de corte se reportaron en Newtons (N).

Medición de la Oxidación de Lípidos

El grado de oxidación de lípidos (TBAR's) se determinó de acuerdo a la técnica descrita por Piccini *et al.* (1986). Se homogeneizaron 10 g de músculo (ESGE Bio homogeneizador modelo M133/1281-0, Bio Spec Products Inc., Bartlesville, OK. EE. UU.) con una solución al 10 % de HCl 6 N durante 40 s. La suspensión resultante se sometió a destilación y se colectaron 50 ml de destilado de muestra. De cada destilado, se tomó una alícuota de 2,5 ml y se mezcló con 2,5 ml de ácido tiobarbiturico (TBA) al 0,02 M y como blanco 2,5 ml de agua

destilada y 2,5 ml de TBA. Las muestras se mezclaron y se incubaron en un baño de agua hirviendo a 100 °C durante 40 min y después se enfriaron durante 10 min en agua corriente y se midió la absorbancia a 535 nm en un espectrofotómetro (Genesys 20, modelo 4001/4; Thermo Spectronic, Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados se representaron frente a una curva estándar de calibración preparada con concentraciones conocidas de tetraetoxipropano. La determinación se realizó por triplicado y los resultados se expresaron como mg de malonaldehído (MDA) por kg de carne (MDA mg/kg de carne).

Evaluación Sensorial

Selección y capacitación de los panelistas. Doce panelistas fueron reclutados y entrenados usando la técnica de análisis cuantitativo descriptivo descrita por Stone *et al.* (2004). Los panelistas fueron seleccionados por la prueba de sabor básico. En la segunda etapa de selección, se utilizó para el gusto una prueba triangular (International Organization for Standardization, ISO, 8586-1, 1993), la prueba de Farnsworth-Munsell 100 Hue se utilizó para la sensibilidad al color. La duración total de la capacitación fue de 80 h, ésta incluyó la familiarización con términos descriptivos relevantes y formas de percibir la selección y cuantificación de las características sensoriales de la carne cocida, así como el uso de escalas de intensidad ISO 4121 (2003). Se ofrecieron muestras representativas al panel final para determinar atributos relevantes, para la evaluación de color (apariencia) se empleó una versión modificada del protocolo AMSA, (2012), donde las escalas pictográficas se elaboraron de acuerdo con la prueba de cocción antes de la evaluación sensorial.

Los panelistas generaron listas individuales de descriptores para cada atributo sensorial (color, olor, sabor y textura) para caracterizar las muestras de carne ISO 8586-2 (1994). A continuación, se creó una lista de consenso con cinco atributos por descriptor, estos términos se utilizaron en el entrenamiento de los panelistas. Los descriptores seleccionados fueron: olor a carne de res (OCR), carne cocinada (OCC), carne fresca (OCF), carne hervida (OCH), olor metálico (OM); color blanquecino (CBQ), rosado (CRD), café grisáceo (CCG), color café claro (CCC), color pálido (CPD); sabor a carne fresca (SCF), aceitoso (SA), a carne seca (SCS), sabor a res (SR) y metálico (SM); textura suave (TS), jugosa (TJ), fibrosa (TF), resistente (TR) y elástica (TE). La intensidad del descriptor para cada atributo se evaluó en una escala lineal de 10 cm con dos puntos ancla. Los términos finales del léxico (descriptores) y las definiciones usadas para el entrenamiento de los panelistas se muestran en el Cuadro 1.

Prueba Sensorial. Las muestras se cocinaron en un sartén eléctrico oblongo (West West Bend Company, West Bend, WI, EE. UU.) a una temperatura interna de 72 °C, siguiendo las directrices establecidas por AMSA, (1995). Las muestras se cortaron en seis piezas iguales y se mantuvieron a 35 °C hasta el análisis sensorial (≤ 30 min); las pruebas se llevaron a cabo bajo luz blanca.

Los panelistas fueron instruidos para limpiar con agua sus paladares entre muestras. Las pruebas sensoriales se realizaron para las muestras sonicadas (U) y no tratadas (C) en tres sesiones.

En cada sesión los panelistas recibieron una muestra seleccionada al azar de 30 g para cada grupo de tratamiento, identificada por un código de tres dígitos.

Cuadro 1. Léxico desarrollado (descriptores que caracterizan las muestras de carne) por los panelistas, utilizado en la evaluación del análisis cuantitativo descriptivo (QDA)

Atributo	Descriptor	Definición
OLOR	Carne de res	Olor que identifica a la carne de res, idéntico a la carne de vacuno
	Carne cocinada	Aroma generalmente asociado con el cebo de la res que ha sido cocida a la parrilla
	Carne fresca	Olor o nota aromática a carne de res fresca cocida
	Carne hervida	Nota aromática asociada con el caldo de la carne cuando hierve
	Metálico	Notas aromáticas asociadas con una ligera impresión a metal oxidado
COLOR	Blanquecino	Mayor percepción de luz blanca sobre la superficie de la carne
	Rosado	Tono pálido del color rojo
	Café grisáceo	La carne se observa de un color menos intenso al café tendiendo al color gris
	Café claro	Color marrón claro, que se refleja con más luz en la superficie
	Pálido	Color en la superficie de la carne que se observa menos saturado
SABOR	Carne fresca	Sabor característico de todas las carnes, aromas asociados comúnmente y en particular a la carne cocida
	Aceitoso	Sabor grasiento, asociado con la grasa calentada a alta temperatura
	Carne seca	Sabor a carne seca, asociado con la carne que se cocina más y se quema en la superficie
	Res	Compuestos aromáticos asociados comúnmente con los productos de carne cocida (caldo de carne hervida)
	Metálico	Sabor metálico asociado con poca cocción (sabor a sangre)
TEXTURA	Suave	Describe a la carne de res que es fácil de morder entre los dientes (baja dureza)
	Jugosa	Percepción de la cantidad de agua liberada por el producto durante la primera mordida
	Fibrosa	Sugiere que la orientación de las partículas en la carne de res es similar a la que se percibe en el apio
	Resistente	Referente al número de mordidas para masticar la carne de res en un estado listo para tragar, similar a la necesitada para la carne de vaca vieja
	Elástica	Describe la rapidez de la recuperación de una fuerza deformada

AMSA, 1995; Byrne *et al.*, 2001; Nollet y Toldrá, 2011

Los panelistas evaluaron las muestras utilizando una escala lineal no estructurada de 10 cm (0= nada, 10= muy). Los datos se registraron en centímetros como puntos de intensidad para cada descriptor.

Análisis Estadístico

Las variables del experimento (EC, OL, y la intensidad de los atributos sensoriales) se analizaron usando el procedimiento del modelo lineal generalizado (SAS software, SAS Institute, 2006) y el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + E_{ijk}$$

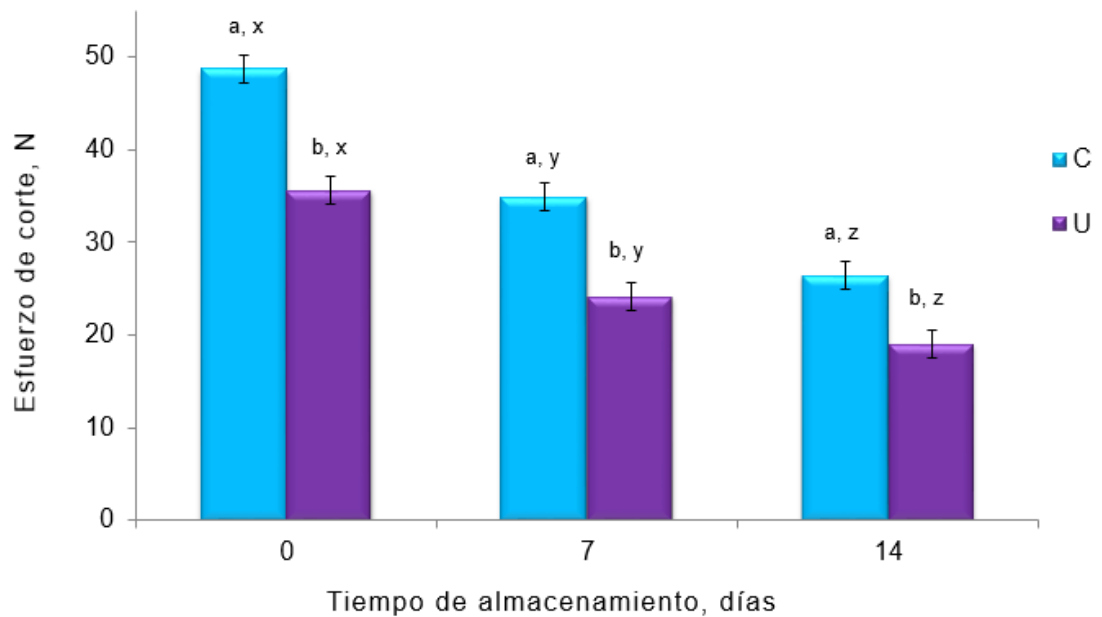
Donde: Y_{ijk} = variable respuesta medida en la repetición k de la aplicación del ultrasonido i y el tiempo de almacenamiento j , μ = media general, A_i = efecto de la aplicación de ultrasonido i , B_j = efecto del tiempo de almacenamiento j , AB_{ij} = efecto de la interacción de la aplicación de ultrasonido i y tiempo de almacenamiento j y E_{ijk} = error aleatorio de la repetición k de la aplicación del ultrasonido i y el tiempo de almacenamiento j . Cuando el efecto de un factor o la interacción de una o más variables fue significativa ($P \leq 0,05$) la prueba estadística de Tukey's se realizó para comparar las medias. Una prueba de análisis de varianza se realizó para determinar el poder discriminante de los descriptores y estimar los coeficientes, utilizando el software del paquete XLSTAT-Sensory® (versión 2015. 6. 01. 25740, Addinsoft© 1995-2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esfuerzo de Corte

El EC difiere significativamente entre la aplicación de ultrasonido y periodos de almacenamiento ($P < 0,0001$, Gráfica 1). Los valores de EC fueron más altos en el día 0 de almacenamiento y disminuyeron significativamente para el día 14 de almacenamiento en las muestras con y sin ultrasonido. Por otra parte, el U redujo significativamente el EC ($P < 0,0001$) en comparación con la carne C la cual mostró valores más altos en todos los tiempos de almacenamiento. Estos resultados corroboran informes previos (Jayasooriya *et al.*, 2007 y Zhuo *et al.*, 2010). Stadnik y Dolatowski (2011) destacaron el potencial del uso de ultrasonido de baja frecuencia y baja intensidad para ablandar la carne, reportando que la dureza de la carne se redujo a las 48-72 h *post mortem*.

En este estudio los resultados de la aplicación del ultrasonido de alta intensidad en los periodos de almacenamiento 7 y 14 puede considerarse un efecto adicional al tiempo de almacenamiento que contribuyó a la disminución del EC en la carne; esto puede observarse al comparar los valores de las muestras U0 y U7 en donde el EC presenta valores similares a los encontrados en las muestras C7 y C14, estos resultados sugieren que con la aplicación del ultrasonido se podría tener una opción que disminuya los tiempos de maduración tradicional en refrigeración con las ventajas que esto conlleva en aspectos de infraestructura, económicos y de calidad e inocuidad de la carne al ser una metodología no contaminante, no ionizante y segura en su aplicación por parte del personal.



Gráfica 1. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la dureza instrumental medida como esfuerzo de corte N (Media $\pm$ E. E.), en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b} Diferentes letras indican diferencia significativa por ultrasonido ($P < 0,0001$). ^{x,y,z} Diferentes letras indican diferencia significativa por tiempo de almacenamiento ($P < 0,0001$).

El efecto del ultrasonido de alta intensidad en la reducción del esfuerzo de corte también ha sido reportado en los siguientes parámetros: 24 kHz and 12 W/cm² por 4 min en carne de bovino (Jayassoriya *et al.*, 2007), 24 kHz y 12 W/cm² por 4 min en carne de ave después de 7 d de almacenamiento (Xiong *et al.*, 2012) y 2.5-3 W/cm² por 180 min en carne de cerdo (Siró *et al.*, 2009). Sikes *et al.* (2014) también observaron una reducción en el esfuerzo de corte y almacenamiento a 4 °C por 7 d (P<0,001) pero no hubo interacción entre el tratamiento de ultrasonido y el tiempo de almacenamiento. Otros resultados difieren, ya que ningún efecto sobre el esfuerzo de corte se reporta con 62 W/cm² (Lyng *et al.*, 1998), 22 W/cm² (Pohlman *et al.*, 1997a) o 4-19 W/cm² (McDonnell *et al.*, 2014). Aunque la aplicación de ultrasonido disminuyó la viscosidad y la cohesión de la carne de cerdo salada en el estudio de McDonnell *et al.*, (2014).

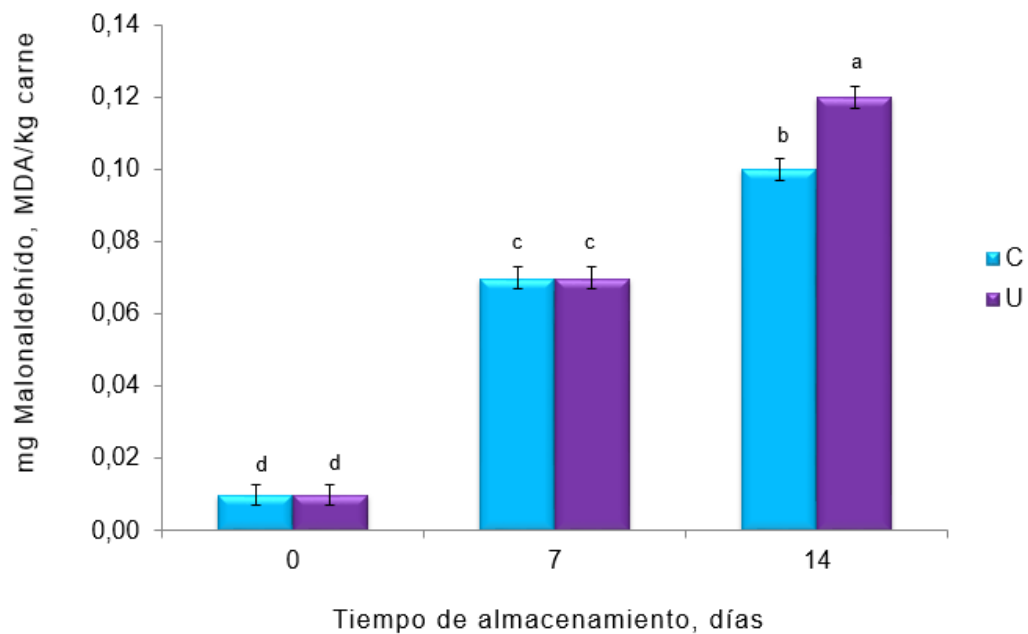
La aplicación de ultrasonido afecta el enternecimiento de la carne a través de la cavitación acústica, fenómeno donde existe generación, crecimiento y eventual colapso de las burbujas causando efectos térmicos, químicos y mecánicos (Yusaf y Al-Juboori, 2014). El colapso asimétrico ocasiona irrupción del fluido produciendo micro burbujas que afectan la integridad de la estructura del músculo (Bhaskaracharya *et al.*, 2009). Este proceso es asociado con la hidrólisis de la proteína miofibrilar *post mortem* en la etapa de maduración que conduce a un mayor ablandamiento de la carne (Geesink *et al.*, 2001) y explicaría la reducción del EC observada en la presente investigación.

Del mismo modo, dependiendo de la frecuencia de ultrasonido, se producen alternadamente presiones positivas y negativas que provocan

compresión y expansión, resultando en la ruptura celular. Este proceso provoca la hidrólisis del agua (Awad *et al.*, 2012), lo que puede conducir a la formación de radicales libres químicamente activos (H^+ y OH^-), que intervienen en la estabilidad estructural y funciones catalíticas de las proteínas. Así la aplicación de ultrasonido puede modificar los niveles disponibles de trifosfato de adenosina en el músculo *pre rigor* (Sikes *et al.*, 2014) también acelerar el inicio del *rigor mortis* (Dolatowski *et al.*, 2004; Stadnik y Dolatowski, 2011) y por lo tanto acelerar la tasa de maduración de la carne (Chandrapala, 2015).

Oxidación de Lípidos

El grado de oxidación de lípidos (OL) en la carne difiere significativamente de acuerdo a la interacción de los factores aplicación de ultrasonido y almacenamiento ($P<0,01$, Gráfica 2). Los valores de OL con y sin tratamiento de ultrasonido fueron más bajos al día 0 de almacenamiento. Estos valores se incrementaron significativamente para el día 14 de almacenamiento en las muestras tratadas ($P<0,01$). La OL en todas las muestras se presentó por debajo del umbral de la rancidez de 1-2 mg MDA/kg (Vieira *et al.*, 2009) y también fue menor que el umbral de detección de olor de oxidación (0,5-1 mg MDA/kg; Tarladgis *et al.*, 1960). Los resultados encontrados coinciden con los reportados por Stadnik, *et al.*, 2008, quienes obtuvieron valores de TBAR's que no comprometían la estabilidad oxidativa de las muestras tratadas con ultrasonido (45 kHz, 2 W/cm² por 120 s) cuando se almacenaron en refrigeración. El ultrasonido rompe las membranas celulares, fragmenta el colágeno, desnaturaliza las proteínas por la implosión de la burbuja y la cavitación, al tiempo



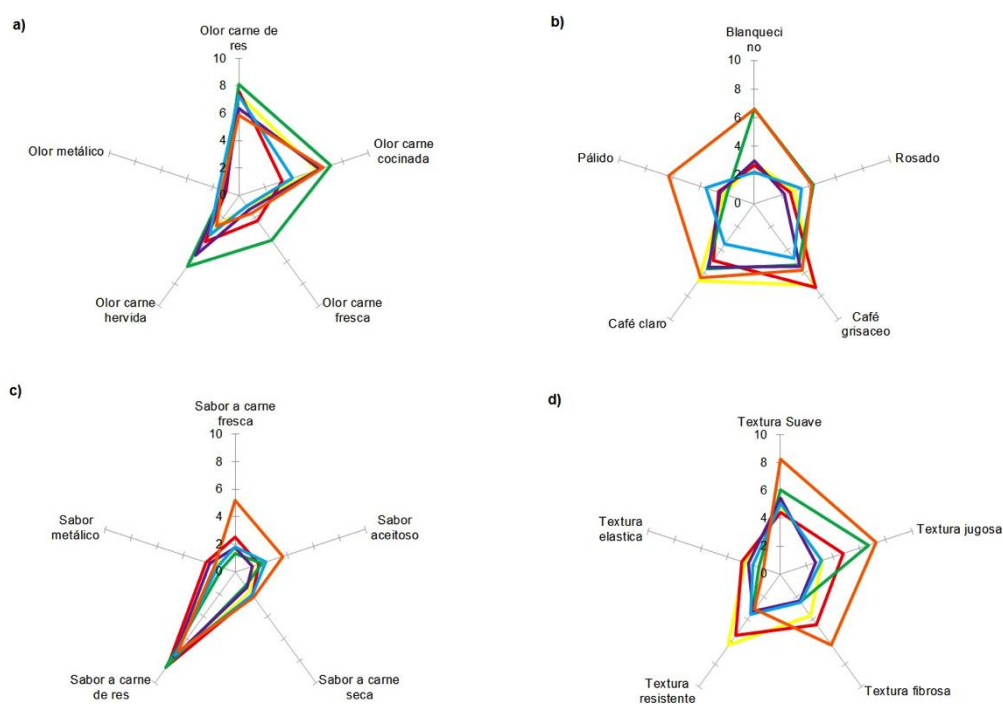
Gráfica 2. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el índice de oxidación lipídica OL (miligramos MDA/kilogramos de carne; Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b,c} y ^d Diferentes letras indican diferencia significativa por interacción de ultrasonido y tiempo de almacenamiento ($P < 0,0089$).

que promueve la formación de radicales libres (Kuijpers *et al.*, 2002).

En consecuencia, la oxidación en la carne se intensifica por el aumento de la velocidad de las reacciones químicas (Awad *et al.*, 2012). Además, la maduración representa un cambio tanto en las estructuras como en la composición química de la carne (*i.e.* los radicales libres se producen durante la maduración, principalmente de la liberación del metal). Las moléculas de membrana grasa y similares a grasas se degradan a ácidos grasos durante la maduración (Dashdorj *et al.*, 2016). Estos dos factores pueden explicar por qué la carne ultrasonicada es ligeramente más oxidada después de 14 d de almacenamiento. Posiblemente, los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) liberados de los fosfolípidos (membranas) durante el envejecimiento se exponen más a los radicales libres liberados durante la sonicación, interaccionando más rápidamente durante el mismo proceso. Dado que la peroxidación lipídica está más fuertemente influenciada por la oxidación de componentes de la membrana como PUFA (Faustman *et al.*, 2010), la exposición de éstos ácidos grasos podría ser responsable del ligero aumento en la carne sonicada. Sin embargo, los valores obtenidos en las muestras sonicadas en nuestro estudio indican cambios mínimos en la oxidación de lípidos durante el almacenamiento.

Propiedades Sensoriales

Los efectos de la aplicación de ultrasonido y el almacenamiento en las características sensoriales de olor y sabor reportaron diferencias significativas por la interacción de estos factores ($P < 0,01$ y $P < 0,0001$ respectivamente Gráficas 3a y 3c). Después de 7 y 14 d de almacenamiento, las muestras C presentaron



Gráfica 3. Descriptores sensoriales (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. a) Descriptores de olor, b) Descriptores de color, c) Descriptores de sabor, d) Descriptores de textura. C0= control (no ultrasonido, 0 d de almacenamiento, amarillo); C7= control (no ultrasonido, 7 d de almacenamiento, rojo), C14= control (no ultrasonido, 14 d de almacenamiento, verde); U0= ultrasonido, 0 d de almacenamiento (morado); U7= ultrasonido, 7 d de almacenamiento (azul); U14= ultrasonido, 14 d de almacenamiento (naranja).

un olor y sabor más intenso; (olor a carne de res ($P<0,0001$), olor a carne fresca ($P<0,0006$) y sabor a carne fresca ($P<0,0001$) comparado con las muestras U.

La aplicación de ultrasonido también aumentó la percepción del sabor aceitoso ($P<0,0034$), más notorio después de 14 d de almacenamiento ($P<0,0001$). Las muestras C fueron percibidas como menos aceitosas en el día 0 ($P<0,0001$), debido al daño estructural o la liberación de lípidos precursores de sabor cocido en la carne. El sabor metálico, sabor a carne seca y el olor metálico, no mostraron diferencias significativas en función del periodo de almacenamiento y la aplicación de ultrasonido.

La intensidad del olor a carne recién cocinada fue menor después de un periodo de almacenamiento de 7 d en muestras sonicadas ($P<0,0001$), esto puede deberse a la concentración de compuestos volátiles (moléculas aromáticas), que podrían ser menores en este periodo de almacenamiento. Stetzer *et al.* (2007, 2008) informaron que los compuestos de sabor positivos disminuyeron con la maduración de la carne (entre 7 y 14 d de almacenamiento) y los compuestos negativos aumentaron. El pentanal y la 3-hidroxi-2-butanona disminuyeron con la maduración, mientras que el ácido nonanal, el ácido butanoico y el 1-octeno-3-ol aumentan.

Tanto la carne U como la C, mostraron más color blanquecino y rosado a los 14 d de almacenamiento ($P<0,0001$, Gráfica 3b) en comparación con las muestras de otros periodos de almacenamiento. La carne C tendió a tener un color grisáceo, con una interacción significativa observada durante los d 0 y 7 de

almacenamiento ($P < 0,0001$). El día 0, la carne C tuvo un color café claro más intenso ($P < 0,0002$) que la carne U.

Al contrario, la menor intensidad de este atributo se observó en muestras U después de 7 d de almacenamiento. Un color más pálido se registró en la carne U a los 14 d de almacenamiento ($P < 0,0001$). Esto puede estar relacionado con los resultados obtenidos por Jayasooriya *et al.* (2007) y Hai-Jun *et al.* (2012), quienes indicaron que la aplicación de ultrasonido genera un aumento en la temperatura muscular. Por lo tanto, la desnaturalización térmica y la oxidación de los pigmentos de la carne podrían afectar el color de la carne, haciéndola más pálida y menos roja.

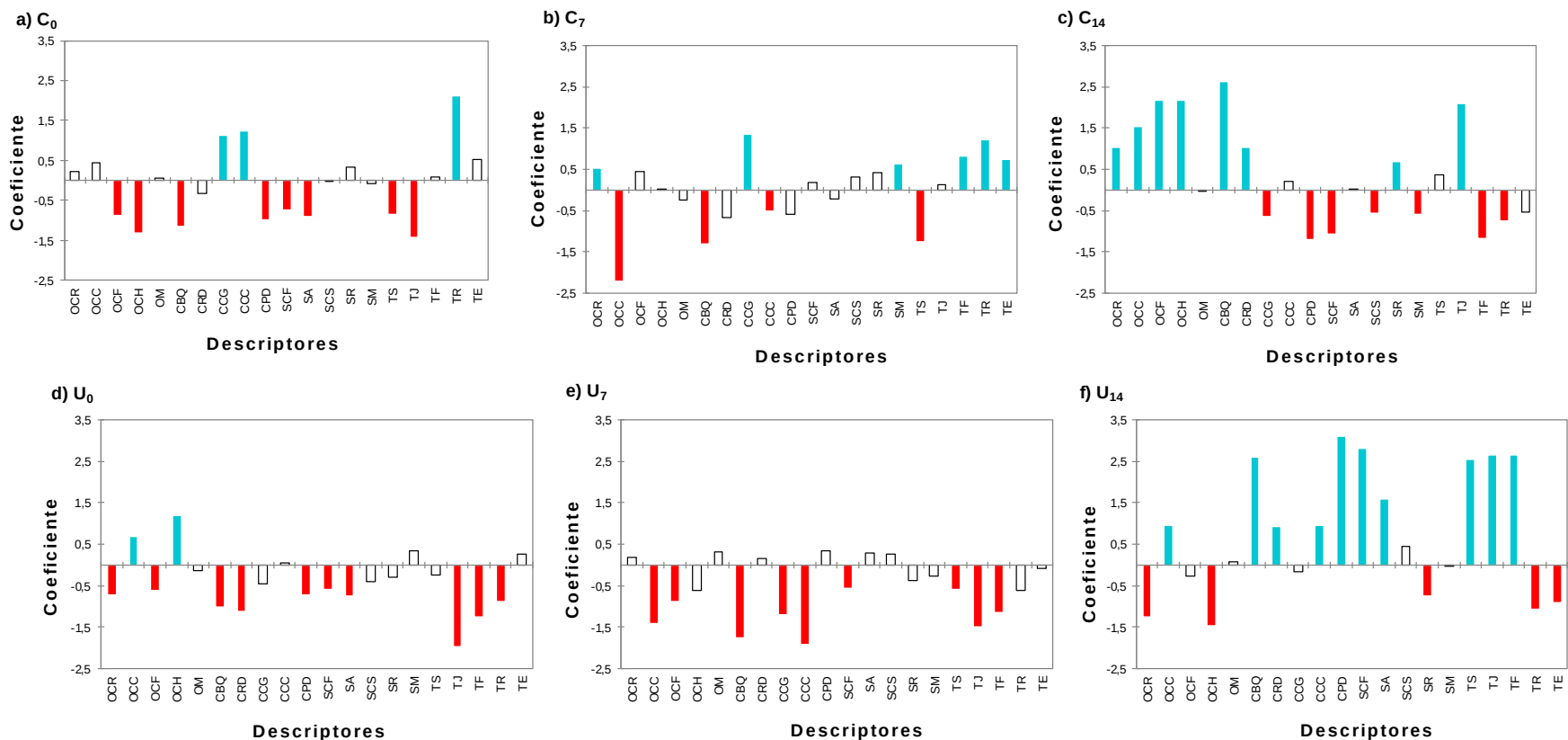
La carne U almacenada durante 14 d fue la más suave y más jugosa de todas las muestras analizadas ($P < 0,0111$ y $P < 0,004$, respectivamente; Gráfica 3c), pero tenía una textura más fibrosa, asociados con menores valores de esfuerzo de corte. La carne C y almacenada durante 7 d tuvo mayor elasticidad ($P < 0,0058$). La carne C en el día 0 de almacenamiento se percibía con la textura más dura de acuerdo con la textura medida instrumentalmente tenía los valores mayores de esfuerzo de corte.

Estos resultados coinciden con Lyng *et al.* (1998), quien indicó que la carne de oveja tratada con ultrasonido y 7 d de almacenamiento se percibía como más suave asociada con el proceso de proteólisis durante el almacenamiento y el efecto de cavitación de la ecografía. Por el contrario, Pholman *et al.* (1997b) no reportaron efecto del tratamiento con ultrasonido y tiempo de almacenamiento en m. *pectoralis* bovino debido a una mayor presencia de tejido conectivo en este

músculo. Se ha afirmado que una textura más suave de la carne después del ultrasonido puede ser explicada por el debilitamiento físico de la estructura muscular, afectando a las membranas celulares por aceleración de la proteólisis y liberación de catepsinas de los lisosomas (Dolatowski *et al.*, 2007; Stadnik y Dolatowski, 2011) y/o iones de calcio del almacenamiento intracelular.

Los descriptores con los factores discriminantes más fuertes para la caracterización de la muestra fueron los atributos de textura, con la excepción de la carne C después de 14 d de almacenamiento y la carne U a los 7 d de almacenamiento (Gráfica 4). La percepción humana está condicionada a la interacción sensorial de los procesos físicos, tales como la masticación; por lo tanto, las propiedades sensoriales están vinculadas a las características físicas (Caine *et al.*, 2003) y la propagación de ondas de ultrasonido en la carne depende de las propiedades de la carne (Damez y Clerjon, 2008). Los resultados del presente estudio muestran que la exposición a ultrasonidos de alta intensidad aumenta la suavidad de la carne, tal como lo perciben los panelistas entrenados que caracterizaron a las muestras tratada con ultrasonido que se había almacenado durante 14 d como la más tierna.

Los atributos sensoriales que resultan de la proteólisis, tales como el olor, sabor, la ternura y jugosidad, se hicieron evidentes debido al proceso de maduración, a medida que incrementaba el periodo de almacenamiento. La aplicación de ultrasonido resultó en efectos de suavidad y jugosidad adicionales durante el periodo de almacenamiento. Estos resultados del panel y del esfuerzo de corte son similares a los obtenidos en otros estudios. Pholman *et al.* (1997



Gráfica 4. Estimación del coeficiente de los descriptores para la carne bovina m. *Longissimus dorsi* con la aplicación de ultrasonido a 4 °C durante 0, 7 y 14 d de almacenamiento. (Intervalo de confianza del 95% modelo $Y = P + J$). C0= control, 0 d de almacenamiento, C7= control, 7 d de almacenamiento, C14= control, 14 d de almacenamiento; U0= ultrasonido, 0 d de almacenamiento, U7= ultrasonido, 7 d de almacenamiento; U14= ultrasonido, 14 d de almacenamiento. OCR= olor a carne de res, OCC= Olor a carne cocinada; OCF= Olor a carne fresca; OCH= Olor a carne hervida; OM= Olor metálico; CBQ= Color blanquecino; CRD= Color rosado; CCG= Color café grisáceo; CCC= Color café claro; CPD= Color pálido; SCF= Sabor a carne fresca; SA= Sabor aceitoso; SCS= Sabor a carne seca; SR= Sabor a carne de res; SM= Sabor metálico; TS= Textura suave; TJ= Textura jugosa; TF= Textura fibrosa; TR= Textura resistente; TE= textura elástica.

realizaron un análisis sensorial de las muestras de carne de bovino (m. *pectoralis* y m. *Longissimus thoracis*) sometidas a ultrasonido (20 kHz, 1000 W/cm²) y almacenamiento, cocinados por convección, y encontraron una mayor sensibilidad miofibrilar ($P < 0,05$) y la reducción de la intensidad del sabor en muestras sonicadas.

El músculo con aplicación de ultrasonido tuvo mayor humedad después de la cocción, pero los autores observaron diferencias en la jugosidad, la cantidad de tejido conectivo y ternura, en general, no se vieron afectadas por el método de envejecimiento.

Lyng *et al.* (1998) publicaron que la evaluación sensorial de m. *Longissimus thoracis*, m. *Lumborum* y m. *Semimembranosus* tratados con ultrasonido (20 kHz y 62 W/cm² durante 15 s) no mostraron diferencias en la sensibilidad, la textura general o la aceptación global después de 0, 3 o 14 d de almacenamiento, sin embargo, encontraron que el tiempo de almacenamiento mejoró significativamente la masticabilidad.

A pesar de las dificultades en la comparación de diferentes experimentos, debido a las diferencias en las combinaciones de frecuencia/intensidad/tiempo de la ecografía aplicada a la carne, la mayoría de las investigaciones reportan efectos favorables de la ecografía en la textura de la carne (Alarcón-Rojo *et al.*, 2015) y ese efecto ha sido corroborado en este estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El ultrasonido de alta intensidad reduce el esfuerzo de corte en carne de bovino y aunque la oxidación de lípidos aumenta, esto no afecta negativamente la calidad de la carne. Por lo tanto, la aplicación de ultrasonido puede ser una forma factible de preservar las propiedades sensoriales de la carne, mientras que se reduce significativamente el tiempo de envejecimiento.

La tecnología de ultrasonido se puede aplicar para mejorar la textura de la carne, como lo confirma el hallazgo de que el ultrasonido de alta intensidad aumenta la ternura de la carne. En este contexto, resulta interesante estudiar variaciones en la aplicación de la ecografía (frecuencia, intensidad, tiempo) y su relación con factores de origen de las muestras de carne (especie, género, edad, dieta o tipo muscular).

Los resultados del análisis sensorial indican que la ecografía no cambia la percepción de los panelistas sobre la calidad de la carne. Los hallazgos de éste trabajo deben complementarse con la evaluación de aceptación de los consumidores para descartar cualquier perjuicio de la técnica a la calidad de la carne.

LITERATURA CITADA

- Alarcón-Rojó, A. D., H. Janacua, J. C. Rodríguez, L. Paniwnyk y T. J. Mason. 2015. Power ultrasound in meat processing meat. *Meat Sci.* 107:86-93.
- AMSA. 1995. American meat science association. Research guidelines for cooker, sensory evaluation and instrumental tenderness measurements of fresh meat. National Livestock and Meat Board Chicago, Ill.
- AMSA 2012. American meat science association. Meat colour measurement guidelines. Champaign Illinois USA.
- Awad, T. S., H. A. Moharram, O. E. Shaltout, D. Asker y M. M: Youssef. 2012. Application of ultrasound in analysis, processing and quality control of food. A review. *Food Res. Int.* 48:410-427.
- Bhaskarachayra, R. K., S. Kentish y M. Ashokkumar. 2009. Selected applications of ultrasonics in food processing. *Food Eng. Rev.* 1:31-49.
- Byrne, D. V., M. G. O'Sullivan, G. B. Dijksterhuis, W. L. P. Bredie y M. Martens. 2001. Sensory panel consistency during development of a vocabulary for warmed-over flavor. *Food Qual. Prefer.* 12:171-187.
- Caine, W. R., J. L. Aalhus, D. R. Best, M. E. R. Dugan y L. E. Jeremiah. 2003. Relationship of texture profile analysis and warner Bratzler shear force with sensory characteristics of beef rib steaks. *Meat Sci.* 64:333-339.
- Cárcel, J. A., J. Benedito, J. Bon y A. Mulet. 2007. High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Sci.* 76:611-619.
- Chandrapala, J. 2015. Low intensity ultrasound applications on foods systems. *Int. Food Res. J.* 22: 888-895.
- Chemat, F., Zill-e Huma y M. K. Khan. 2011. Applications of ultrasound in food technology: processing preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem.* 18:813-835.
- Damez, J. L. y S. Clerjon. 2008. Meat quality assessment using biophysical methods related to meat structure. *Meat Sci.* 80:132-149.
- Dashdorj, D., V. K. Tripathi, S. Cho, K. Younghoon y I. Hwang. 2016. Erratum to: Dry aging of beef; Review. *J. Anim. Sci. Technol.* 58:20-30
- Demirdöven, A. y T. Baysal. 2009. The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Rev.* 25:1-11.
- Dolatowski, Z. J., J. Twarda y M. Dudek. 2004. Changes in hydration of meat during the ageing process. *Annales UMCS, Sec. E.* 59:1595-1606.

- Dolatowski, Z. J., J. Stadnik y D. Stasiak. 2007. Applications of Ultrasound in food technology. *Acta Sci. Pol., Technol. Aliment.* 6:89-99.
- Faustman, C., Q. Sun, R. Mancini y S. P. Suman. 2010. Myoglobin and lipid oxidation interactions: Mechanistic bases and control. *Meat Sci.* 86:86-94.
- Gallego-Juárez, J. A. 2010. High-power ultrasonic processing recent developments and prospective advances. *Phys. Procedia.* 3:35-47.
- Geesink, G. H., R. G., Taylor, A. E. D. Bekhit y R. Bickerstaffe. 2001. Evidence against the non-enzymatic calcium theory of tenderization. *Meat Sci.* 59: 417-422.
- Hai-Jun, Ch., X. Xing-Lian y Z. Guang-Hong. 2012. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef Semitendinosus muscle during ultrasonic processing. *Acta Sci. Pol., Technol. Aliment.* 5:285-297.
- ISO, 1993. Sensory Analysis. General guidance for the selection, training and monitoring of assessors, Part 1. Selected assessors. International organization for Standardization 8586-1.
- ISO, 1994. Sensory Analysis. General guidance for the selection, training and monitoring of assessors, Part 2. Experts by ISO TC 34/SC12, 8586-2.
- ISO, 2003. Sensory Analysis. Guidelines for the use for quantitative response scales. International organization for Standardization 4121.
- Jayasooriya, S. D., P. J. Torley, B. R. D'Arcy y B. R. Bhandari. 2007. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine Semitendinosus and Longissimus muscle. *Meat Sci.* 75. 628-639.
- Kentish, S. y H. Feng. 2014. Applications of power ultrasound in food processing. *Annu. Rev. Food. Sci.* 5:14.1-14.22.
- Knorr, D., M. Zenker, V. Heinz y L. Dong-Un. 2004. Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends Food Sci. Tech.* 15:261-266.
- Kuijpers, M. W. A., M. F. Kemmere y J. T. F. Keurentjes. 2002. Calorimetric study of the energy efficiency for ultrasound-induced radical formation. *Ultrasonics.* 40:675-678.
- Lyng, J. G., P. Allen y B. M. McKenna. 1998. The effect on aspects of beef tenderness of pre- and post-rigor exposure to a high intensity ultrasound probe. *J. Sci. Food Agric.* 78:308-314.
- Maher, S. C., A. M. Mullen, A. P. Moloney, D. J. Buckley y J. P. Kerry. 2004. Quantifying the extent of variation in the eating quality traits of the m.

- longissimus dorsi* and *M. semimembranosus* of conventionally processed Irish beef. Meat Sci. 66:351-360.
- Mandour, H. A., M. Bashari, C. Lagnika, Q. He y X. Sun. 2014. Effect of ultrasound treatment prior to vacuum and modified atmosphere packaging on microbial and physical characteristics of fresh beef. J. Food Nut. Res. 2:312-320.
- Margulis, M. A. y L. M. Margulis. 2003. Calorimetric method for measurement of acoustic power absorbed in a volume of a liquid. Ultrason. Sonochem. 10:343-345.
- McDonnell, C. K., P. Allen, C. Morin y J. G. Lyng. 2014. The effect of ultrasonic salting on protein and water protein interactions in meat. Food Chem. 147:245-251.
- Miles, C. A., M. J. Morley y M. Rendell. 1999. High power ultrasonic thawing of frozen foods. J. Food Eng. 39: 151-159.
- Nollet, M. L. y F. Tóldra. 2011. Sensory analysis of food of animal origin, Ch. II Processed meats and poultry, Part 10. "Sensory descriptors for cooked meat products" Hayes, E. Jenny. CRC Press Taylor and Francis Group, Ed. Boca Raton London New York.
- Piccini, J. L., D. R. Evans y H. O. Quaranta. 1986. Comparison of TBA number of irradiated fish with sensory quality. Food Chem. 19:163-171.
- Pohlman, F. W., M. E. Dikeman y D. H. Kropf. 1997a. Effects of high intensity ultrasound treatment, storage time and cooking method on shear, sensory, instrumental color and cooking properties of packaged and unpackaged beef pectoralis Muscle. Meat Sci. 46: 89-100.
- Pohlman, F. W., M. E. Dikeman, J. F. Zayas y J. A. Unruh. 1997b. Effect ultrasound and convection cooking to different and point temperatures on cooking characteristics, shear force and sensory properties, composition, and microscopic morphology of beef *longissimus* and *pectoralis* muscle. J. Anim. Sci. 75:386-401.
- SAS, Institute. 2006. SAS/STAT User's Guide. SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA.
- Sikes, A. L., R. Mawson, J. Stark y R. Warner. 2014. Quality properties of pre- and post-rigor beef muscle after interventions with high frequency ultrasound. Ultrason Sonochem. 21: 2138-2143.
- Siró, I., C. Vén, C. Balla, G. Jónas, I. Zeke y L. Friedrich. 2009. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. J. Food Eng. 91:353-362.

- Stadnik, J. 2008. Influence of sonication on the oxidative stability of beef. *Roczniki Instytutu Przemysłu Miesnego i Tłuszczowego*, 47:63-68.
- Stadnik, J. y Z. J. Dolatowski. 2011. Influence of sonication on warner-bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (*m. semimembranosus*). *Eur. Food Res. Technol.* 233: 553-559.
- Stadnik, J., Z. J. Dolatowski y H. M. Baranoswska. 2008. Effect of ultrasound treatment on water holding properties and microstructure of beef (*M. semimembranosus*) during ageing. *Food Sci. Technol.* 41: 2121-2158.
- Stetzer, A. J., E. Tucker, F. K. McKeith y M. S. Brewer. 2007. Quality changes in beef *Gluteus medius*, *Infraspinatus*, *Psoas major*, *Rectus femoris* and *Teres major* enhanced prior to aging. *J. Food Sci.* 72: S242-S246.
- Stetzer, A. J., Tucker E., McKeith F. K and Brewer M. S. 2008. Quality changes in beef *complexus*, *Serratus ventralis*, *Vastus lateralis*, *Vastus medialis*, and *Longissimus dorsi* muscles enhanced prior to aging. *J. Food Sci.* 73: S6-S10.
- Stone, H., J. Sidel, S. Oliver, A. Woolsey y R. C. Singleton (Ed.) 2004. "Sensory Evaluation by quantitative Descriptive Analysis, in *Descriptive Sensory Analysis in Practice*". Food & Nutrition Press. Connecticut, USA.
- Tarladgis, B. G., B. M. Watts, M. T. Younathan y L. R. A. Dugan. 1960. Distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 37:44-48.
- Terefe, N. S., A. L. Sikes y P. Juliano. 2016. Ultrasound for structural modification of food products. In Knoerzer K., Juliano P., Smithers G. W. *Innovative food processing technologies: Extraction, separation, component modification and process intensification*. Woodhead Publishing, 510p.
- Vieira, C., M. T. Díaz, B. Martínez y M. D. García-Cachán. 2009. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of ageing. *Meat Sci.* 83:398-404.
- Ünver, A. 2016. Applications of ultrasound in food processing. *Green Chem. Technol. Lett.* 3:121-126.
- Xiong, G. Y., L. L. Zhang, W. Hang y J. Wu. 2012. Influence of ultrasound and Proteolytic Enzyme inhibitors on Muscle Degradation, Tenderness, and Cooking Loss of Hens During Aging. *Czech J. Food Sci.* 30: 195-205.
- Yusaf, T. y R. A. Al-Juboori. 2014. Alternative methods of microorganism disruption for agricultural applications. *Appl. Energ.* 114:909-923.

Zhuo, G. H., X. L. Xu y Y. Liu. 2010. Preservation technologies for fresh meat – A review. Meat Sci. 86: 119-128.

**ESTUDIO 2. CALIDAD FISICOQUÍMICA, SENSORIAL Y
MICROESTRUCTURA DE CARNE DE BOVINO CON ULTRASONIDO Y
ALMACENAMIENTO**

RESUMEN

CALIDAD FISICOQUÍMICA, SENSORIAL Y MICROESTRUCTURA DE CARNE DE BOVINO CON ULTRASONIDO Y ALMACENAMIENTO

POR:

M. C. Esmeralda Mónica Peña González

Doctor in Philosophia en Producción Animal

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Ph. D. Alma Delia Alarcón Rojo.

Las características de calidad más deseadas en la carne cruda es el color, mientras que otras características como aroma, ternura y sabor se valoran tras el proceso de cocción. Para mantener estas características se pueden emplear metodologías no destructivas en los alimentos como el ultrasonido de alta intensidad. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del ultrasonido de alta intensidad en las características fisicoquímicas, sensoriales y microestructurales en carne de bovino almacenada en refrigeración. Las muestras de m. *Longissimus dorsi* fueron almacenadas en refrigeración (4° C) por 0, 7 y 14 días y aplicación de ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) durante 60 min. Las muestras sonicadas y almacenadas por 7 d presentaron incremento del pH, fueron menos rojas hacia el final del almacenamiento, con mayor pérdida por goteo y menor esfuerzo de corte ($P<0,05$). La carne almacenada por 14 d y con ultrasonido tiene olor más intenso a carne fresca, hervida y cocinada ($P<0,05$),

es más pálida y de color café grisáceo. El sabor de la carne sonicada y evaluada por el panel sensorial se evaluó con mayor intensidad en sabor metálico ($P < 0,05$) y un sabor más aceitoso cuando se almacenó por 14 d. Así mismo presentaron una textura suave y jugosa por efecto de la ultrasonificación ($P < 0,05$). El ultrasonido de alta intensidad no afectó negativamente las variables evaluadas, por lo que se considera potencialmente seguro su uso para inducir el ablandamiento de la carne de bovino manejada bajo las condiciones de este estudio.

ABSTRACT

PHYSICOCHEMICAL, SENSORIAL AND MICROSTRUCTURE OF BEEF BY HIGH INTENSITY ULTRASOUND AND STORAGE

BY:

Esmeralda Mónica Peña González

The most desired quality characteristics in raw meat is color, while other characteristics such as aroma, tenderness and flavor are evaluated after the cooking process, to maintain these characteristics non-destructive methodologies are used in food. The objective of this research was to evaluate the effect of high intensity ultrasound on the physicochemical, sensory and microstructural characteristics of beef stored in refrigeration. The samples of m. *Longissimus dorsi* were stored in refrigeration 4° C for 0, 7 y 14 d and application of ultrasound (40 kHz, 11 W/cm²) for 60 min. The samples sonicated and stored for 7 d presented pH increase, were less red towards the end of the storage, with greater drip loss and less cutting effort ($P<0,05$). Meat stored for 14 d and treated with ultrasound has a more intense odor of fresh, boiled and cooked meat ($P<0,05$), is paler and of a grayish-brown color. The flavor of the meat sonicated and evaluated by the sensorial panel was evaluated with greater intensity in metallic taste ($P<0,05$) and more oil taste when stored for 14 d. They also presented a soft and juicy texture due to the effect of ultrasonication ($P<0,05$). High-intensity ultrasound did not negatively affect the variables evaluated, so it is considered potentially safe to use to induce the softening of beef cattle under the conditions of this study.

INTRODUCCIÓN

El aroma, el color, el sabor y la terniza son las propiedades sensoriales más importantes para la población consumidora de carne (Mandour *et al.*, 2014). Diversas metodologías han sido consideradas para retener las propiedades nutricionales y sensoriales de la carne fresca y sus productos respondiendo a las expectativas de los consumidores en cuanto a inocuidad y calidad de los alimentos (Demirdöven y Basysal, 2009).

Las características importantes de la calidad de la carne, como materia prima, para la producción de alimentos y que tienen gran impacto en la industria son el pH, la capacidad de retención de agua, la textura y la estabilidad oxidativa. Se requiere de metodologías que aseguren la transformación y la conservación e integridad de los alimentos. La técnica ecográfica o ultrasónica está siendo explorada en el proceso y conservación de la carne como tecnología complementaria o asistida (Patis y Bates, 2008).

Las ondas de ultrasonido se dividen en dos categorías, el de baja intensidad ($<1 \text{ W/cm}^2$) y alta frecuencia (1 a 10 MHz), que es una tecnología no destructiva que proporciona información sobre propiedades fisicoquímicas y de composición; y de alta intensidad ($> 5 \text{ W/cm}^2$ o 10 a 1000 W/cm^2) y baja frecuencia (20 a 100 kHz), que ha mostrado tener efecto en propiedades físicas o químicas de los alimentos (Jayasooriya *et al.*, 2004; Cárcel *et al.*, 2007; Patist y Bates 2008). Se han reportado efectos positivos del ultrasonido en el procesado de los alimentos tales como la emulsificación (Zhao *et al.*, 2014), descongelación, congelación (Gambuteanu y Alexe, 2013), transferencia de masa (Ozuna *et al.*,

2013), blandura de la carne (Chang *et al.*, 2015) y marinado (McDonnell *et al.*, 2014) entre otros.

Uno de los procesos que más llama la atención a la industria de la carne es la maduración. Los métodos tradicionales de maduración requieren tiempo e implican altos costos, por lo tanto, una alternativa eficiente sería la aplicación de la ecografía, esta consideración se hace en base a los resultados obtenidos en el estudio 1 de esta investigación en la que se encontró una disminución gradual del EC y que había sido reportado por (Jayasooriya *et al.*, 2007) quienes indicaron que el ultrasonido de alta potencia puede inducir en la carne el ablandamiento en el corto tiempo. El mecanismo parece ser consecuencia del debilitamiento de la estructura celular (Stadnik y Dolatowski, 2011) por la desnaturalización de proteínas (Siró *et al.*, 2009) ocasionando la irrupción del tejido muscular, lo cual resulta en un incremento en la ternura de la carne (Hai-Jun *et al.*, 2015) y una reducción del periodo de maduración, sin afectar las otras propiedades de calidad fisicoquímica y sensorial.

Los resultados reportados en la literatura no son concluyentes con respecto al efecto de ablandamiento, por lo que es necesario hacer más investigación antes de poner a disposición esta metodología a nivel industrial. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del ultrasonido de alta intensidad sobre las características fisicoquímicas, texturales, sensoriales y microestructurales de la carne de bovino almacenada a 4 °C.

MATERIALES Y MÉTODOS

Naturaleza de las Muestras y Unidad Experimental

Las muestras de m. *Longissimus dorsi* se colectaron 24 h *post mortem*. Estas eran provenientes de bovinos Hereford (PV 450 kg) alimentados en sistemas de intensivos de producción de carne. Previo a las determinaciones del músculo se retiró hueso, grasa y tejido conectivo y se consideró como unidades experimentales porciones de 13.0 cm x 9.0 cm x 2.54 cm. A cada tratamiento se le asignó de manera aleatoria 12 porciones de músculo. Cada unidad experimental (muestras destructivas) fue empacada al vacío (Koch easy-pack 2001, Geprüfte sicherheit, Koch Supplies Inc. Kansas City) en bolsas de polipropileno y se almacenaron a 4 °C durante 0, 7 y 14 d.

Tratamientos y Aplicación del Ultrasonido

La potencia efectiva del sistema de ultrasonido se determinó utilizando la técnica calorimétrica descrita por Margulis y Margulis (2003). El tratamiento de ultrasonificación (40 kHz y 11 W/cm²) se aplicó después de cada periodo de almacenamiento establecido (0, 7 y 14 d). Las muestras fueron ultrasonificadas durante 60 min (30 min/lado), en un baño ultrasónico modificado (Branson® 1510 modelo 1510R-MTH, Branson Ultrasonics Corporation U.S.A.) utilizando agua destilada como medio de difusión. Durante la ultrasonificación y el periodo de almacenamiento la temperatura fue de 4 °C. Los tratamientos fueron: C₀ = 0 d de almacenado, sin ultrasonificación; C₇ = 7 d de almacenado, sin ultrasonificación; C₁₄ = 14 d de almacenado, sin ultrasonificación; U₀ = 0 d de almacenado y ultrasonificación; U₇ = 7 d de almacenada y ultrasonificación; U₁₄ = 14 d de

almacenada y ultrasonificación. Después de la aplicación del ultrasonido la carne se acondicionó para cada análisis.

Determinación de las Variables Fisicoquímicas

Medición del pH. El pH se midió con una sonda de punción conectada a un medidor de pH modelo CR-400 Hanna (Rumania). El pH se determinó como la media de las lecturas tomadas en tres sitios distintos del músculo.

Medición del color. Se midió usando un colorímetro Minolta Chroma Meter (CR-400 Konica Minolta Sensing, Inc., Tokyo, Japón) basado en el sistema CIEL (L^* , a^* y b^*). El equipo fue calibrado previamente contra una placa blanca ($Y = 94.00$, $x = 0.3155$, $y = 0.3318$). Las muestras fueron retiradas del empaque y oxigenadas durante 15 min, la medición se realizó por triplicado colocando directamente la apertura del medidor de forma vertical, en zonas homogéneas, libres de grasa intramuscular o manchas de sangre.

Medición de la capacidad de retención de agua (CRA). La CRA de la carne se determinó por triplicado usando el método descrito por Grau y Ham (1953), con algunas modificaciones. Aproximadamente 0.3 g de muestra se pesaron en una balanza analítica (Scientech, mod SA210 USA, con una precisión de 0.1 mg), la muestra se colocó en medio de dos papeles filtro y entre dos placas de plexiglass (15 x 15 cm), se aplicó una fuerza constante de 5.0 kg por 20 min. Debido a la fuerza ejercida en la muestra, los líquidos de la carne se liberaron impregnando el papel considerándose esa como el agua libre de la carne. Para obtener la CRA se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ agua libre} = [(P_i - P_f) / P_i] \times 100$$

CRA = 100 - % agua libre

donde: Pi es el peso inicial de la muestra y Pf es el peso final de la muestra después de la compresión.

Medición de la pérdida por goteo (PG). La PG se midió empleando el método de Honikel y Kim (1986). Se pesó una muestra de 3.0 g la cual fue suspendida en un vaso de plástico evitando tocar las paredes y base del mismo. Los recipientes fueron tapados y almacenados a 4° C por 48 h, transcurrido este tiempo la muestra se retiró del vaso y se pesó nuevamente. El porcentaje de pérdida por goteo se calculó con la siguiente ecuación y se expresó en porcentaje.

$$PG = (P_i - P_f) / P_i$$

Donde: Pi es el peso inicial de la muestra y Pf es el peso final de la muestra después de las 48 h.

Determinación de la Textura Instrumental

Determinación del esfuerzo de corte (EC). El esfuerzo de corte se realizó, de acuerdo a la técnica descrita por American Meat Science Association Guidelines (AMSA, 1995). Las muestras fueron colocadas en bolsas plásticas herméticas y se cocinaron en un baño María (Fisher Scientific® mod. Isotemp 215) hasta alcanzar una temperatura interna de 72 °C en el centro geométrico de la muestra, posteriormente fueron drenadas y almacenadas a 4 °C por 24 h. Después de este periodo, de cada tratamiento se cortaron diez cilindros de 1 cm de diámetro (con un sacabocados), los cortes se realizaron de forma paralela a las fibras musculares. A continuación, las muestras (cilindros) fueron cortados

perpendicularmente a la dirección de la fibra muscular utilizando el accesorio Warner-Bratzler colocado en un texturómetro (TA. TX2i, Stable Micro Systems Surrey, Inglaterra). Los parámetros establecidos para la prueba fueron: velocidad pre-prueba de 2 mm s^{-1} , velocidad en la prueba de 2 mm s^{-1} , velocidad pos-prueba de 10 mm s^{-1} y una distancia de la zona de prueba de 30 mm. El pico máximo de fuerza registrado durante el ensayo se reportó como valor de la fuerza de cizallamiento y el resultado se expresó en Newton (N).

Análisis de perfil de textura (APT). Las mediciones se realizaron en diez muestras de cada tratamiento estandarizadas geométricamente con un Vernier (1.9 cm x 1.8 cm x 0.8 cm) a 4 °C. Un pistón cilíndrico de 3.6 cm de diámetro se utilizó para una prueba de compresión de dos ciclos a 75 % de su altura original; con un tiempo de descanso entre ciclo de 5 s. Las curvas de deformación de fuerza-tiempo se registraron con una celda de carga de 25 kg aplicada a una velocidad pre-prueba de 2.0 mm/s, durante la prueba 1.0 mm/s y post-prueba de 1.0 mm/s. Los parámetros cuantificados (Bourne 1978; Álvarez *et al.*, 2012) fueron los siguientes: Adhesividad (N mm) = el área de fuerza negativa para el primer bocado que representa el trabajo necesario para tirar del émbolo de compresión de distancia de la muestra; Cohesividad (Ch) = relación de las terminales positivas de la zona de fuerza durante la segunda compresión es adimensional; Dureza = definida como la fuerza máxima que se requiere para la primera compresión y se expresa en unidades fuerza (N); Elasticidad (Sp) = distancia (mm) de la muestra después de la recuperación de la primera compresión; Fracturabilidad (N) = la fuerza requerida para producir la primera

fractura; Elasticidad (mm) = muestra la distancia se recupera después de la primera compresión y Masticabilidad (CW) = trabajo (N mm) necesario para masticar y deglutir la muestra (determinada por $Sp \times Ch$). Las mediciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente y se realizaron diez repeticiones.

Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Los cambios microestructurales de la fibra muscular en muestras de carne cruda sometidas a ultrasonido se analizaron usando un microscopio electrónico de barrido Jeol JSM-6390 (Japón), a un voltaje de aceleración de 10 kV. Las muestras se procesaron de acuerdo con la metodología descrita por Hernando *et al.* (2010), con algunas modificaciones. Se obtuvieron submuestras de carne paralelas a la orientación de la fibra muscular en un estereoscopio (Carl Zeiss®) de $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$, de cada uno de los periodos de almacenamiento y se fijaron en una solución de 2.5 % de glutaraldehído con fosfato de Sorensen a pH 7.0 por 72 h a 4 °C. Las muestras se lavaron con una solución buffer fosfato de sodio pH 7.2 a temperatura ambiente por 10 min en tres ocasiones. Posteriormente, se realizó la deshidratación de las muestras con una serie de gradientes de etanol-agua (iniciando en 30 % y aumentando hasta llegar a 100 %) por 20 min en cada concentración a temperatura ambiente. Las muestras se secaron a punto crítico con CO₂ inicialmente se sumergieron en una solución de etanol al 96%, después se pasaron a una solución de etanol al 100 %. Se llevaron al horno Tousimis Samdri 780A (Rockville, USA) y se secaron bajo las siguientes condiciones 1250 psi a 34 °C. Finalmente se colocan en un desecador. Se colocaron en porta muestra con cinta adhesiva de cobre y se realizó un

recubrimiento con oro usando un ionizador (Joel Fine Coat Ion Sputter JFC-1100) y se observaron al microscopio electrónico.

Evaluación Sensorial

Conformación y entrenamiento del panel. De 20 individuos, se seleccionaron 12 para integrar el grupo de jueces considerando los siguientes factores: aptitud, interés, deseo de cooperar en el estudio, tiempo disponible y no aversión por los productos cárnicos. Además, se evaluó la capacidad y estado de salud mediante pruebas de discriminación sensorial para la detección de sabores, olores y colores básicos; determinando así la idoneidad para la fase de entrenamiento. El grupo de jueces entrenados estuvo formado por 10 hombres y 2 mujeres, con una edad promedio de 22 años.

Entrenamiento de los jueces evaluadores. Los panelistas fueron entrenados mediante la técnica de QDA (análisis descriptivo cuantitativo, por sus siglas en inglés) descrito por Stone *et al.* (2004). La duración total del entrenamiento fue de 80 h, éste consistió en la familiarización de los términos descriptivos y la forma de percibir las características sensoriales de la carne (color, terneza, jugosidad, aroma y sabor); también se les instruyó en el uso de escalas de intensidad. Después los panelistas generaron una lista individual de descriptores de cada uno de los atributos que les permitió discriminar las muestras de carne, posteriormente se realizó la comparación de descriptores para cada uno de los atributos y se obtuvo una lista consensual de cuatro descriptores por atributo con su definición (Cuadro 2). Se evaluó la intensidad de

Cuadro 2. Definiciones de descriptores desarrollados por los panelistas para caracterizar m. *Longissimus dorsi* con y sin ultrasonido de alta intensidad y almacenamiento 4 °C

Atributo	Descriptor	Definición
OLOR	Carne de res	Olor que identifica a la carne de res, idéntico a la carne de vacuno
	Carne cocinada	Aroma generalmente asociado con el cebo de la res que ha sido cocida a la parrilla
	Carne fresca	Olor o nota aromática a carne de res fresca cocida
	Carne hervida	Nota aromática asociada con el caldo de la carne cuando hierve
COLOR	Blanquecino	Mayor percepción de luz blanca sobre la superficie de la carne
	Rosado	Tono pálido del color rojo
	Café grisáceo	La carne se observa de un color menos intenso al café tendiendo al color gris
	Pálido	Color en la superficie de la carne que se observa menos saturado
SABOR	Aceitoso	Sabor grasiento, asociado con la grasa calentada a alta temperatura
	Carne fresca	Sabor característico de todas las carnes, aromas asociados comúnmente y en particular a la carne cocida
	Res	Compuestos aromáticos asociados comúnmente con los productos de carne cocida (caldo de carne hervida)
	Metálico	Sabor metálico asociado con poca cocción (sabor a sangre)
TEXTURA	Suave	Describe a la carne de res que es fácil de morder entre los dientes (baja dureza)
	Jugosa	Percepción de la cantidad de agua liberada por el producto durante la primera mordida
	Fibrosa	Sugiere que la orientación de las partículas en la carne de res es similar a la que se percibe en el apio
	Elástica	Describe la rapidez de la recuperación de una fuerza deformada

AMSA, 1995; Byrne *et al.*, 2001; Nollet y Toldrá, 2011

los descriptores por atributo utilizando una escala lineal de 10 cm con dos puntos ancla, además se realizó una evaluación del desempeño del panel donde se obtuvo una concordancia significativa ($P < 0,05$)

Los atributos que conformaron la lista final para la evaluación de las muestras en estudio fueron: olor a carne de res (OCR), olor a carne fresca (OCF), olor a carne hervida (OCH), olor a carne cocinada (OCC), color blanquecino (CBQ), color rosado (CRD), color café grisáceo (CCG), color pálido (CPD), sabor aceitoso (SA), sabor a carne fresca (SCF), sabor a res (SR), sabor metálico (SM), textura suave (TS), textura jugosa (TJ), textura fibrosa (TF) y textura elástica (TE).

Prueba sensorial. Las muestras se cocinaron en un baño María (Fisher Scientific® 215 Isotemp 215 Pittsburg, USA.), hasta alcanzar una temperatura interna de 72 °C según la metodología establecida por AMSA (1995). Las muestras fueron cortadas para obtener seis trozos homogéneos y se mantuvieron a una temperatura de 35 °C hasta el momento del análisis sensorial (no más de 30 min). La prueba se realizó en condiciones de iluminación con luz blanca. Los panelistas fueron instruidos para limpiarse el paladar entre las muestras con agua.

La evaluación de las muestras de carne ultrasonicada se realizó en tres sesiones, en cada sesión los panelistas recibieron una muestra aleatoria de 30 g de cada tratamiento, identificada con un código de tres dígitos; los panelistas evaluaron las muestras sobre una escala lineal no estructurada de 10 cm (0=nada a 10=muy). Los datos obtenidos (registrados en cm) indicaron los valores para la intensidad de cada descriptor.

Análisis Estadístico

Las variables evaluadas pH, Color, CRA, PG, EC, APT y la intensidad de los atributos sensoriales fueron analizadas por el procedimiento GLM de SAS® (2006), y el modelo estadístico fue:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + E_{ijk};$$

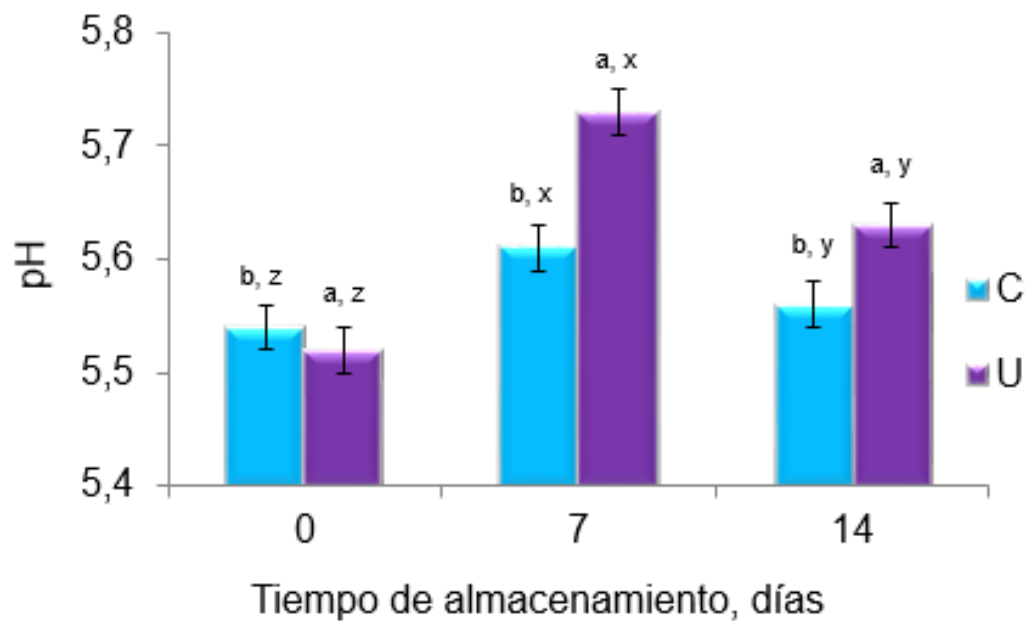
Donde: Y_{ijk} = variables respuesta medida en la repetición k de la aplicación del ultrasonido i y el tiempo de almacenamiento j ; μ = media general; A_i = efecto de la aplicación del ultrasonido i ; B_j = efecto del tiempo de almacenamiento j ; AB_{ij} = efecto de la interacción de la aplicación de ultrasonido i y tiempo de almacenamiento j y E_{ijk} = error aleatorio de la repetición k de la aplicación del ultrasonido i y el tiempo de almacenamiento j . Cuando el efecto de un factor o la interacción de una o más variables fue significativa ($P < 0,05$) la prueba estadística de Tukey's se realizó para comparar las medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

pH

Los valores de pH difieren significativamente por el ultrasonido ($P<0,05$) y por el tiempo de almacenamiento ($P<0,0001$, Gráfica 5). La aplicación de ultrasonido incrementó el pH (5.63 ± 0.01) comparado con las muestras C (5.57 ± 0.01). Con respecto a los periodos de almacenamiento los valores de pH se incrementaron conforme transcurrió el tiempo observándose los valores más altos el día 7 (5.67 ± 0.18) de almacenamiento.

Se considera que el incremento del pH puede estar asociado a la liberación de iones a partir de la estructura en el citosol o a cambios en la estructura de la proteína con la consecuente modificación en la posición de algunos grupos iónicos (Got *et al.*, 1999). Se piensa que un incremento rápido de pH ocasionado por el tratamiento con ultrasonido puede tener implicaciones importantes en la ternura de la carne (Dransfield, 1994). Es bien conocido que el pH es uno de los parámetros con gran influencia en la calidad de la carne y está directamente relacionado con características tales como capacidad de retención de agua, pérdida por goteo, color y textura de la carne (Huff-Lonergan y Lonergan, 2005). Por lo tanto, es un indicador importante de calidad de la carne fresca y procesada. Los valores de pH observados en el presente estudio están dentro de los valores normales de la carne, en un rango de 5.4 y 5.6 (Lawrie y Ledward, 2006). Investigaciones previas muestran resultados similares a los observados en este estudio. Got *et al.* (1999) publicaron un incremento en el pH de muestras de *m. Semitendinosus* con aplicación de ultrasonido (2.6 MHz, 10 W/cm²) almacenadas



Gráfica 5. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el pH (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b} Diferentes letras indican diferencias significativas por ultrasonido (P<0,05). ^{x,y,z} Diferentes letras indican diferencias significativas por tiempo de almacenamiento (P<0,0001).

en periodos de 2, 3, 6 y 14 d; en donde observaron la clásica caída exponencial de pH encontrándose valores de 5.7 en muestras C y hacia el final del almacenamiento se reportaron valores de 5.4. Así mismo Jayasooriya *et al.* (2007) encontraron que el pH se afectó por influencia del tipo de músculo empleado (*Longissimus lumbarum* y *thoracis*, *Semitendinosus*), aplicación de ultrasonido (24 kHz, 12 W/cm²) y tiempo de almacenamiento 0, 1, 3, 5 y 8.5 d). Ellos reportaron valores promedio de 5.48 y 5.57 en el día 0 para los músculos analizados y observaron que el pH mostraba una tendencia a incrementar conforme transcurrían los periodos de almacenamiento. Contrariamente a los resultados de las investigaciones antes mencionadas Stadnik, (2008) no reportó efecto en el pH después de la aplicación con ultrasonido (45 kHz, 2 W/cm²) en muestras de músculo *Semimembranosus* evaluados a 0,1, 2, 3 y 4 d, aunque indicaron encontrar valores más altos en las muestras sometidas a ultrasonido con respecto a las muestras control.

Color

Entre los factores que contribuyen al aspecto de un producto el color ocupa un lugar preponderante en la decisión del consumidor para aceptarlo o rechazarlo. Esto hace necesaria su medición para obtener un juicio de la calidad comercial de un producto. El color físico es el resultado de la interacción de la luz con la materia del producto observado y es posible hacer una distribución espectral dependiente del iluminante que se use para su determinación (Hutchings, 1999).

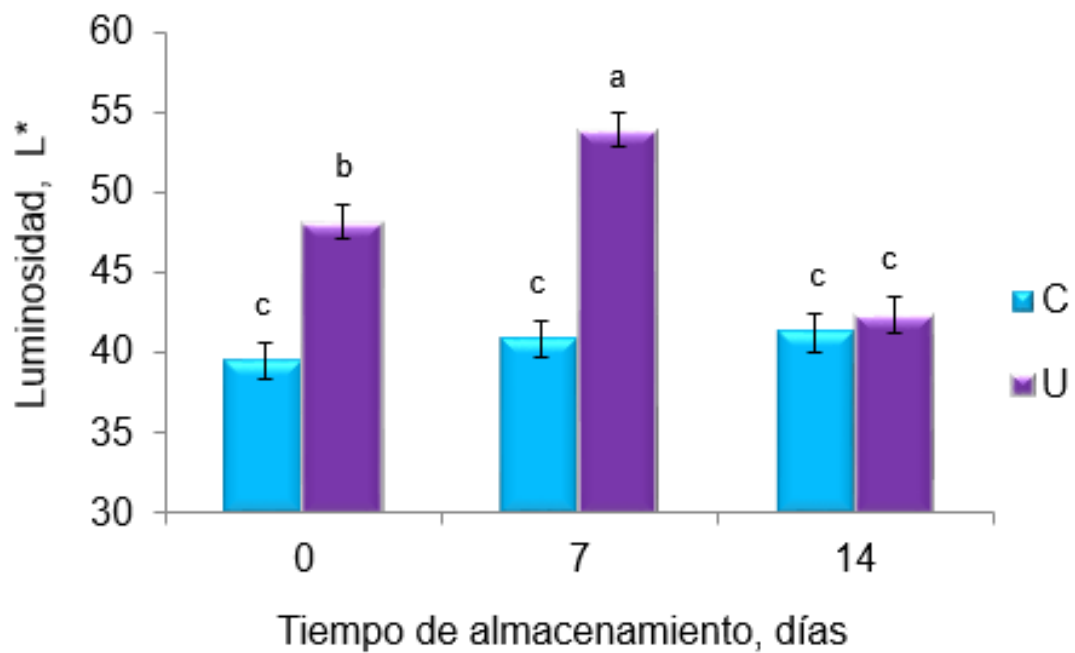
Luminosidad (L*). Este parámetro del color reportó diferencias significati-

vas por la interacción de los factores ultrasonido y tiempo de almacenamiento ($P < 0,0001$, Gráfica 6). En general la carne U presentó los valores de luminosidad más altos en todos los períodos de almacenamiento comparado con las muestras C. Esto se observó con mayor evidencia los días 0 y 7 de almacenamiento en donde se encontraron los valores de luminosidad más altos (48.21 y 54.01 respectivamente) para las muestras U en los periodos de almacenamiento evaluados.

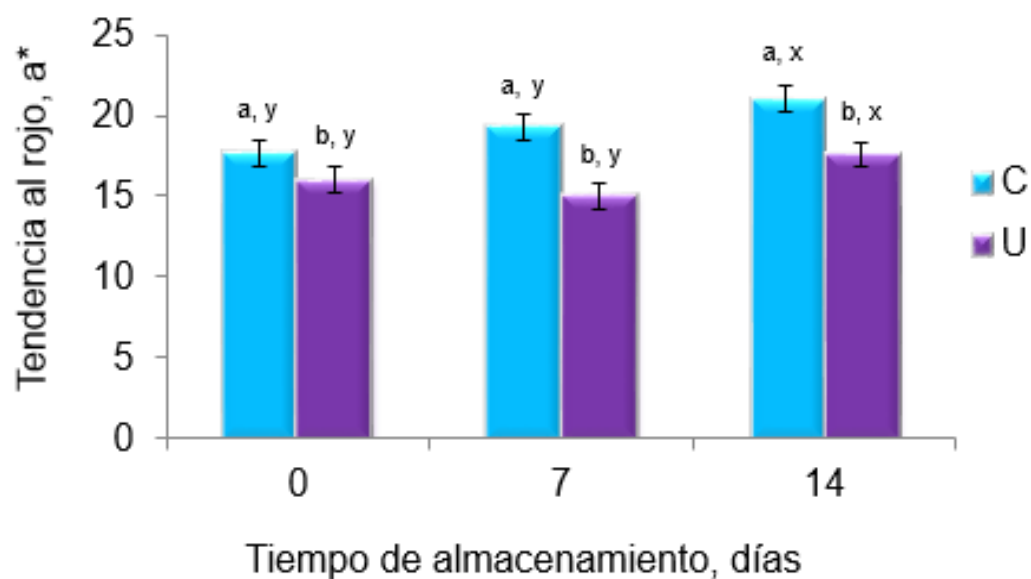
Tendencia al rojo (a^*). Este parámetro observó diferencias significativas por efecto de los factores ultrasonido ($P < 0,0001$) y tiempo de almacenamiento ($P < 0,05$; Gráfica 7). Las muestras C mostraron mayor tendencia al color rojo (19.35) comparandose con las muestras U (16.19). Por otra parte, conforme transcurren los períodos de almacenamiento la tendencia de las muestras al color rojo se incrementó, esto se demuestra al finalizar el tiempo de almacenamiento en donde se encontraron valores mayores (19.31) comparados con los días 0 y 7.

Tendencia al amarillo (b^*). Los valores obtenidos mostraron diferencias significativas ($P < 0,05$) por el factor tiempo de almacenamiento (Gráfica 8). En general, la tendencia de las muestras hacia el color amarillo se ve reflejado conforme se incrementa el tiempo de almacenamiento las muestras de los días 7 y 14 ofrecieron los valores más altos (12.51 y 12.95).

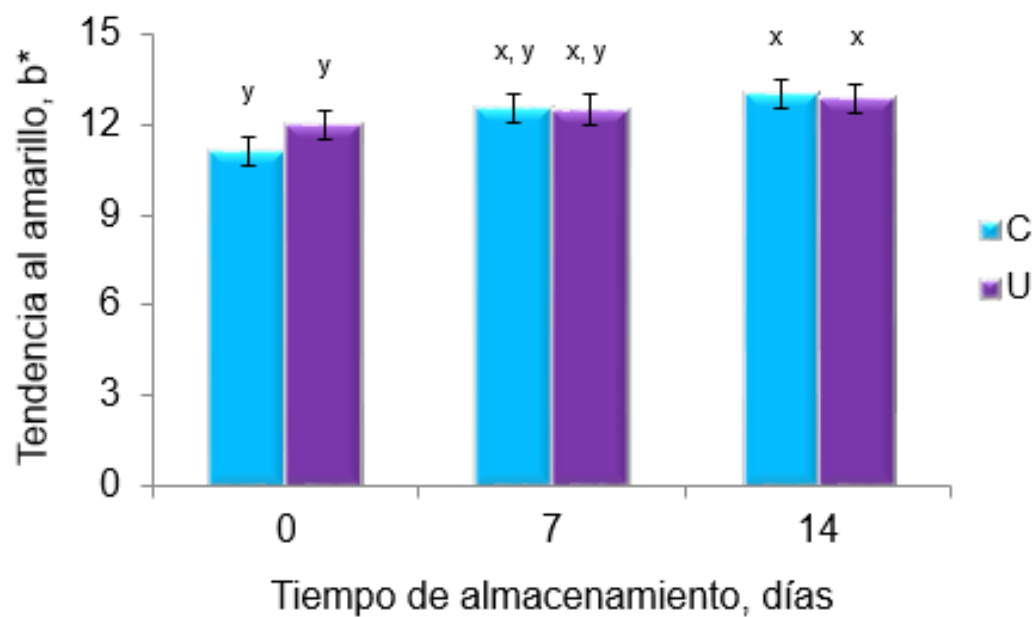
Croma (C^*). Los valores de la medida de saturación observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) por factores aplicación de ultrasonido y tiempo de almacenamiento (Gráfica 9). Las muestras C observaron valores mayores de



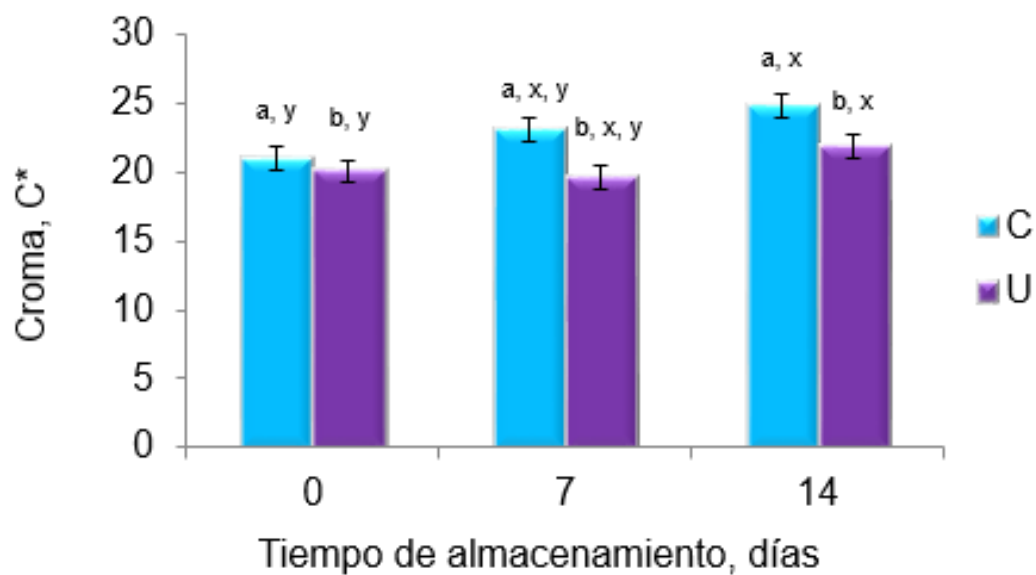
Gráfica 6. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la Luminosidad L* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz y 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b,c} Diferentes letras indican diferencias significativas por interacción de ultrasonido y tiempo de almacenamiento (P<0,0001).



Gráfica 7. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la tendencia al rojo a^* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b} Diferentes letras indican diferencias significativas por ultrasonido ($P < 0,0001$) ^{x,y} Diferentes letras indican diferencias significativas por tiempo de almacenamiento ($P < 0,05$).



Gráfica 8. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la tendencia al amarillo b^* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{x,y} Diferentes letras indican diferencias significativas por tiempo de almacenamiento (P<0,05).



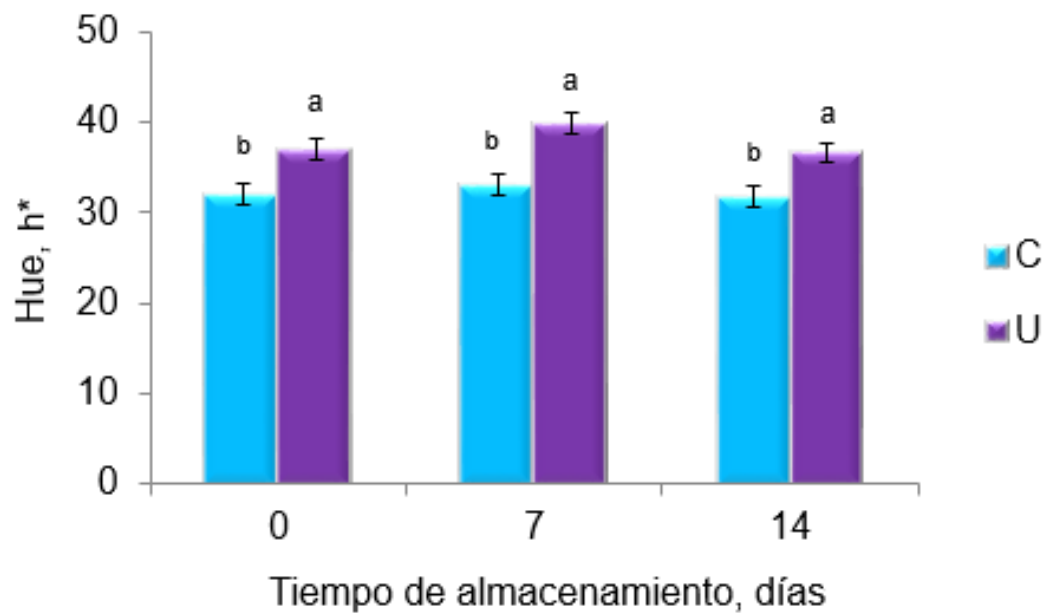
Gráfica 9. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la saturación Cromo C* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b} Diferentes letras indican diferencias significativas por ultrasonido (P<0,05) ^{x,y} Diferentes letras indican diferencias significativas por tiempo de almacenamiento (P<0,05).

saturación (22.90) con respecto a las muestras U. Así mismo durante el periodo de almacenamiento las muestras almacenadas a 14 d reportaron los valores más altos (23.30) de saturación con respecto a las muestras de los periodos de almacenamiento anteriores.

Hue (h*). Se encontraron diferencias significativas por efecto de factor ultrasonido ($P < 0,0001$) las muestras U reportaron mayores valores de tonalidad (37.84) con respecto a las muestras C (32.02) Gráfica 10.

Los resultados reportados por Jayasooriya *et al.* (2007) no indican diferencias significativas en el parámetro de luminosidad L^* por influencia de tratamiento con ultrasonido (24 kHz, 12 W/cm²; durante 0, 60, 120 y 240 s) y tiempo de almacenamiento (0, 3, y 7 d) por otra parte indicaron diferencias significativas en la tendencia al rojo (a^*), tendencia al amarillo (b^*) y tonalidad o croma (C^*) por influencia del tiempo de almacenamiento (0, 3, y 7 d) observándose incremento en los valores de los días 0 y 3 de almacenamiento.

Por su parte Stadnik y Dolatowski (2011) no reportaron diferencias significativas en los parámetros del color evaluado por efecto del tratamiento con ultrasonido (45 kHz, 2 W/cm², 120 s) o tiempo de almacenamiento (1, 2, 3 y 4 d), aunque las muestras se caracterizaron por ser más luminosas observando que incrementaban los valores de tendencia al rojo conforme avanzaba el tiempo de almacenamiento. En algunos estudios la aplicación con ultrasonido no presentó efecto significativo en L^* , a^* y b^* en carne sonicada por 30 min (Hai-Jun *et al.*, 2012). Contrariamente a lo reportado por las anteriores investigaciones Pholman *et al.* (1997b) informaron el efecto del ultrasonido (20 kHz, 22 W/cm², durante 5



Gráfica 10. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el Tono h^* (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b} Diferentes letras indican diferencias significativas por ultrasonido ($P < 0,05$) ^{x,y} Diferentes letras indican diferencias significativas por tiempo de almacenamiento ($P < 0,05$).

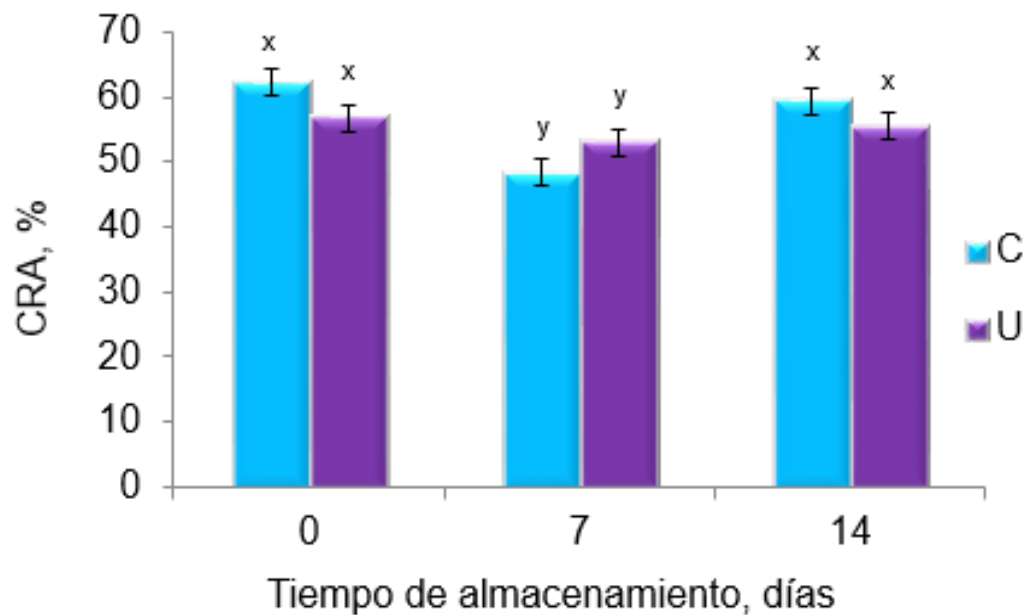
y 10 min) cuando se almacenaron muestras de bovino por 1, 6 o 10 d indicando que la carne del m. *pectoralis* es más luminosa, menos roja, más amarilla, con tendencia a una tonalidad naranja y menos saturada comparada con las muestras control, a causa del calor generado durante la ultrasonicación.

Gambuteanu *et al.* (2013b) y Pholman *et al.* (1997a) mencionaron que las discrepancias en los resultados pueden atribuirse a un mayor tiempo de ultrasonido empleado, nivel de potencia utilizado, tipo de músculo, incremento en la temperatura durante la sonicación, aunque se consideró también que el calor generado no fue suficiente para la desnaturalización y oxidación de pigmentos del color (mioglobina y metamioglobina) y el tamaño de la muestra a la que se sometió a ultrasónico (Stadnik y Dolatowski, 2011).

Capacidad de Retención de Agua (CRA)

En la carne, el agua está presente en tres formas: agua unida, inmovilizada y libre. El agua ligada representa una fracción muy pequeña (menos de una décima parte) del agua total (Offer y Knight, 1988), y es el agua ligada químicamente a la estructura de la carne y no puede ser liberada. El agua inmovilizada, se mantiene ya sea por efectos estéricos o por atracción al agua unida y representa menos del 40 %. El agua libre, se pierde fácilmente durante procedimientos de procesamiento tales como corte, cocción y almacenamiento, ya que se mantiene entre las fibras principalmente por fuerzas capilares (Honikel y Kim, 1986).

En la Gráfica 11 se presentan los resultados de la CRA del presente estudio. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) por tiempo de almace-



Gráfica 11. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la capacidad de retención de agua CRA (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{x,y} Diferentes letras indican diferencias significativas por tiempo de almacenamiento (P<0,05).

namiento. Las muestras de 0 y 14 d de almacenamiento aumentaron la CRA, contrariamente, las muestras del periodo 7 d ofrecieron menor CRA. Esto podría ser debido a que la CRA de cualquier músculo es mínima a bajo pH, pero tiende a incrementarse con la maduración debido a la degradación de proteínas y cambios en las cargas eléctricas debido a un re-arreglo intramolecular (Lawrie y Ledward, 2006).

La capacidad de la carne para retener agua puede verse afectada por el pH final (Petracci *et al.*, 2012). Los estudios indican que a medida que el pH aumenta y se aproxima a la neutralidad, un número de cargas iónicas aumentan entre las fibras musculares, por lo tanto, aumentando la cantidad de agua desde el estado libre al estado inmovilizado; como resultado, se puede aumentar la cantidad de agua retenida. Por lo tanto, cuanto más alto sea el pH, mayor será la CRA de la carne y mejor textura, jugosidad y sabor de la carne cocida (Owens *et al.*, 2010).

Algunos estudios microscópicos han sugerido que el ultrasonido induce una oxidación moderada de miosina causando polimerización, lo cual podría contribuir a un incremento en la capacidad de retención de agua (Kang *et al.*, 2017). Sin embargo, este efecto de ultrasonido no fue observado en el presente estudio, ya que la CRA no presentó efecto del ultrasonido solo por el almacenamiento.

Durante la maduración se presentan ciertas degradaciones en la microestructura proteica de la carne lo cual se refleja en los espacios

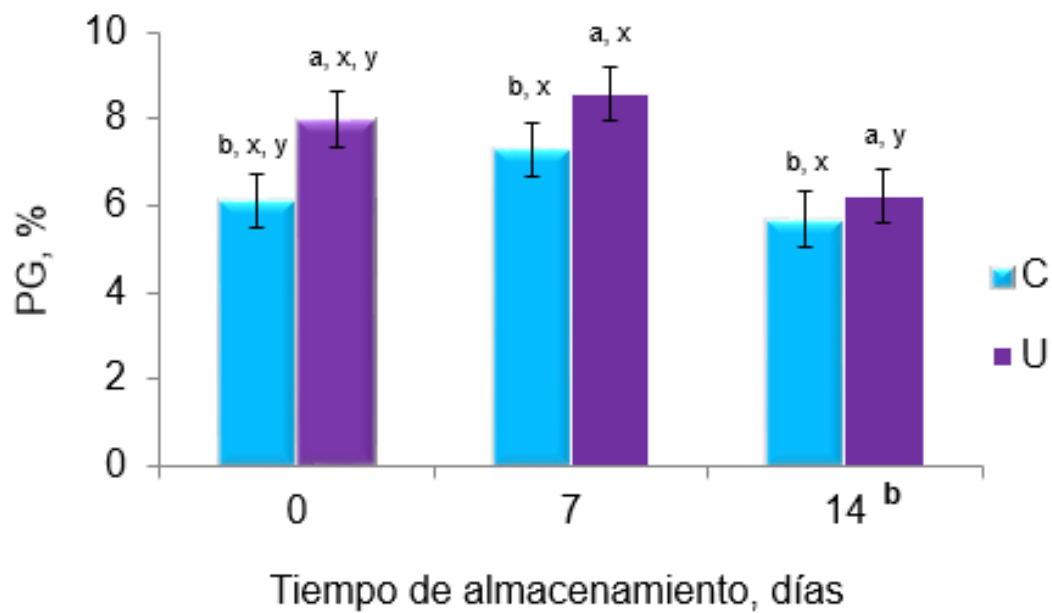
interfibrilares y presentándose consecuentemente un incremento en la CRA (Chang *et al.*, 2015).

Resultados similares a los del presente estudio han sido reportados por Dolatowski *et al.* (2000) quienes observaron cambios estructurales en las proteínas miofibrilares de la carne de bovino (*Semimembranosus*) después de la aplicación ultrasonido (25 kHz, 2 W/cm²), lo que sugiere una aceleración del envejecimiento de la carne. Así mismo Stadnik, (2008) indicaron que las muestras de bovino reportaron mayor capacidad de retención de agua después de la ultrasonificación (45 kHz, 2 W/cm²) típicas de una carne en avanzada etapa *post mortem*. Sin embargo, el efecto del ultrasonido fue corroborado con las imágenes de microestructura.

Por su parte Pholman *et al.* (1997b) consideraron que se debe controlar los cambios en la funcionalidad de las proteínas, absorción de agua, los cambios hidrostáticos e hidrodinámicos que se producen en los espacios dentro del músculo por el tratamiento de la carne con ultrasonido lo que ayudaría a la retención de la humedad.

Pérdida por Goteo (PG)

Los resultados de la PG de la carne se reportan en la Gráfica 12. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) por ultrasonido y tiempo de almacenamiento. En general las muestras U presentaron más pérdida por goteo comparado con las muestras C. Por otra parte, el comportamiento de la pérdida por goteo difiere entre periodos de almacenamiento ya que los días 0 y 7 presentaron valores mayores de PG, contrariamente las muestras almacenadas



Gráfica 12. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en la pérdida por goteo PG (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b} Diferentes letras indican diferencias significativas por ultrasonido (P<0,05); ^{x,y} Diferentes letras indican diferencias por tiempo de almacenamiento (P<0,05).

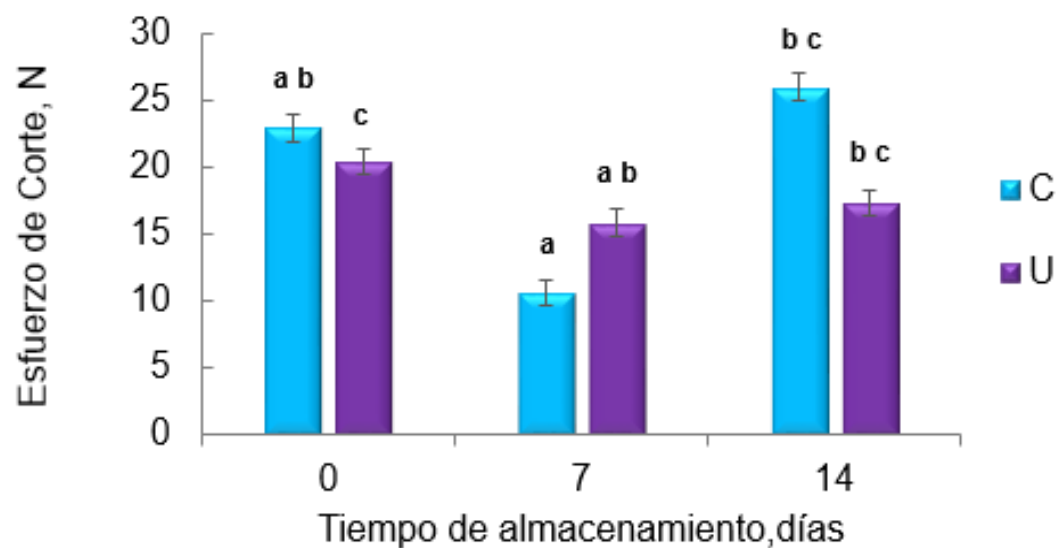
por 14 d reportaron las menores pérdidas por goteo.

Como lo habían reportado Caraveo *et al.* (2015), se observa una relación inversa entre CRA y PG. Esto significa que, si la CRA es baja, la pérdida de goteo durante el almacenamiento es mayor debido a la exudación de la superficie (Judge *et al.*, 1989). En este estudio las muestras que tuvieron una CRA alta mostraron las PG más bajas.

Estos daños son ocasionados por el efecto del ultrasonido sobre los mecanismos de la migración de agua en la carne mediante la formación de espacios entre las fibras musculares y el tejido conectivo (Jayasooriya *et al.*, 2007) lo cual permite el movimiento de agua con mayor rapidez o la desnaturalización térmica de proteínas miofibrilares a causa del calor generado por el ultrasonido. Similarmente, los resultados obtenidos por Dolatowski *et al.* (2000) reportan que el ultrasonido (25 kHz, 2 W/cm² durante 1 a 2 min) reduce la pérdida por goteo de los músculos *Semimembranosus* (1.77) comparada con las muestras control (2.14) y consideraron que la PG puede atribuirse también a una liberación progresiva del fluido intracelular durante la maduración de la carne.

Textura Instrumental

Esfuerzo de corte (EC). Los resultados del EC indicaron diferencias ($P < 0,05$) por la interacción de los factores evaluados (Gráfica 13). En general las muestras U reportaron menores valores de EC. Así mismo, las muestras C y almacenadas por 0 y 14 d mostraron valores mayores de EC con respecto a las muestras tratadas con U en los mismos periodos de almacenamiento, contrariamente las muestras almacenadas a 7 con y sin ultrasonido reportaron



Gráfica 13. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el esfuerzo de corte EC (Media $\pm$ E. E.) en muestras m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. ^{a,b,c} Diferentes letras indican diferencias significativas por interacción de ultrasonido y tiempo de almacenamiento (P<0,05).

menor esfuerzo de corte.

Es posible que la aplicación de ultrasonido induzca cambios en la cantidad de ATP disponible en el músculo durante el estado *pre rigor* (Sikes *et al.*, 2014) lo cual podría acelerar el establecimiento del *rigor mortis* y aumentar la velocidad de la maduración de la carne (Zhou *et al.*, 2010). Sin embargo, este efecto no se observó en las muestras C0 y U0 en este estudio que reportaron mayor esfuerzo de corte junto con la muestra C14 y U14, estos resultados pueden estar relacionados con la desnaturalización y precipitación de las proteínas que implican una contracción estructural progresiva en donde se originan menos espacios para el agua y cuyo efecto está ampliamente relacionado con el endurecimiento de la carne (Ozuna *et al.*, 2013).

La degradación *post mortem* de las proteínas miofibrilares, está estrechamente ligada a cambios estructurales que se reflejan en una mayor suavidad de la carne durante la maduración (Lian *et al.*, 2013), esto puede ser lo que ocurrió en las muestras C7 y U7 en donde se encontraron los menores valores de dureza. Por otra parte, la cavitación acústica del ultrasonido podría actuar en el tejido de la carne: rompiendo la integridad de las células y promoviendo las reacciones enzimáticas (Boistier-Marquis *et al.*, 1999).

La efectividad del ultrasonido en suavizar el músculo esquelético ha sido observada principalmente en carne de bovino (Stadnik y Dolatowski, 2011; Siró *et al.*, 2009) y ha sido atribuido a la ruptura mecánica de la estructura de proteínas miofibrilares (Stadnik, 2008); la fragmentación de las macromoléculas de colágeno (Hai-Jun *et al.*, 2012) y la migración de proteínas, minerales y otros

compuestos con la consecuente aceleración de la proteólisis o desnaturalización de las proteínas (Siró *et al.*, 2009). Los estudios de Jayasooriya *et al.* (2007) mostraron que los m. *Longissimus lumbarum*, *thoracis* y *Semitendinosus* a los que se les aplicó ultrasonido (24 kHz, 12 W/cm², por 0, 30, 60, 120 y 140 s) y almacenados por 0, 1, 3, 5 y 8.5 d fueron significativamente más blandos que el control a cualquier tiempo de almacenamiento siendo el esfuerzo de corte de m. *Semitendinosus* menor que el de los m. *Longissimus thoracis* y *lumborum*.

Algunos autores (Stadnik y Dolatowski, 2011; Sikes *et al.*, 2014) consideraron que la aplicación del ultrasonido puede modificar el ATP disponible en el músculo en etapa *pre rigor*. En consecuencia, acelerar la instauración del *rigor mortis* y la maduración de la carne (Chandrapala, 2015). Así mismo otros autores han considerado que la naturaleza de la vibración y la cavitación del ultrasonido puede conducir el debilitamiento físico de la estructura del músculo generando un mecanismo de tenderización en la carne (Got *et al.*, 1999; Smith *et al.*, 1991). Aún falta corroborar estas teorías, pues a la fecha es difícil tener resultados concluyentes del efecto del ultrasonido en la carne debido a los múltiples factores que influyen en la aplicación, y aunado a la naturaleza tan heterogénea del tejido muscular.

Análisis de perfil de textura (APT). El principio del perfil de textura es la simulación de la acción de masticado. La prueba de TPA es uno de los métodos de prueba más populares para una variedad de productos alimenticios y fue desarrollado por un grupo de científicos de *General Foods* a principios de los años 60's. Se basa en una compresión de dos ciclos en la que una muestra

cilíndrica se comprime dos veces hasta un punto de deformación predeterminado (Bourne, 1978). Ellos establecieron algunos parámetros que se correlacionan bien con los datos sensoriales.

El resultado de la evaluación de las variables del perfil de textura de las muestras evaluadas del presente estudio se reporta en el Cuadro 3. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) por efecto del ultrasonido en la dureza de la carne. Los valores son menores en las muestras U con respecto a las muestras C.

La fracturabilidad reportó diferencias significativas ($P < 0,05$) por el tiempo de almacenamiento, las muestras de U a 0 d de almacenamiento reportaron valores mayores para esta variable (0.06) con respecto a los otros periodos de almacenamiento evaluados. Por otra parte, las variables adhesividad, cohesividad, elasticidad y masticabilidad no presentaron diferencias significativas ($P > 0,05$) por ninguno de los factores o su interacción evaluados.

El ultrasonido induce cambios en macromoléculas tales como las enzimas, que permanecen activas en el periodo *post mortem* y que son capaces de ocasionar cambios en la estructura de la carne. Esto podría ser la causa de los cambios observados en propiedades como blandura, cohesividad, adhesividad, fibrosidad, entre otros. Tal como lo observaron Hai-Jun *et al.* (2012) quienes observaron en m. *Semitendinosus* bovino un efecto significativo del ultrasonido (40 kHz, 1500 W, durante 10, 20, 30, 40, 50 y 60 min) sobre la dureza, elasticidad, cohesión, gomosidad y masticabilidad de la carne.

Cuadro 3. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el perfil de textura APT de carne de bovino m. *Longissimus dorsi* con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenamiento a 4 °C por 0, 7 y 14 d (Media $\pm$ E. E.)

Característica	Factor ¹				
	C	U	0	1	2
Dureza (N)	35.05 $\pm$ 2.10 ^a	25.38 $\pm$ 2.10 ^b	32.48 $\pm$ 2.58 ^x	30.57 $\pm$ 2.58 ^x	27.61 $\pm$ 2.58 ^x
Fracturabilidad	0.05 $\pm$ 0.01 ^a	0.05 $\pm$ 0.01 ^a	0.06 $\pm$ 0.01 ^x	0.05 $\pm$ 0.01 ^{xy}	0.03 $\pm$ 0.01 ^y
Adhesividad Nmm	-1.36 $\pm$ 0.76 ^a	-3.48 $\pm$ 0.76 ^a	-0.91 $\pm$ 0.93 ^x	-3.13 $\pm$ 0.93 ^x	-3.21 $\pm$ 0.93 ^{xll}
Cohesividad	0.55 $\pm$ 0.06 ^a	0.53 $\pm$ 0.06 ^a	0.59 $\pm$ 0.07 ^x	0.52 $\pm$ 0.07 ^x	0.50 $\pm$ 0.07 ^x
Elasticidad mm	0.49 $\pm$ 0.01 ^a	0.45 $\pm$ 0.01 ^a	0.48 $\pm$ 0.02 ^x	0.47 $\pm$ 0.02 ^x	0.46 $\pm$ 0.02 ^x
Masticabilidad (N)	7.86 $\pm$ 0.72 ^a	6.49 $\pm$ 0.72 ^a	7.63 $\pm$ 0.88 ^x	7.21 $\pm$ 0.88 ^x	6.68 $\pm$ 0.88 ^x

¹ C= Control (sin ultrasonido); U= tratamiento con ultrasonido; 0= Sin almacenamiento; 1= 7 días de almacenamiento a 4 °C; 2= 14 días de almacenamiento a 4 °C.

^{a,b} Diferentes letras indican diferencias significativas por tratamiento de ultrasonido (P<0,05).

^{x,y} Diferentes letras indican diferencias significativas por tiempo de almacenamiento (P<0,05).

Adicionalmente, se ha reportado que los parámetros del perfil de textura (TPA) son más útiles para explicar la variación de la blandura sensorial que los valores de esfuerzo de corte en carne de res cruda o cocinada (Caine *et al.*, 2003; Ruiz de Huidobro *et al.*, 2004). Por lo tanto, la mejor forma de predecir la blandura de la carne evaluada por panelistas entrenados es a través del PTA, particularmente con las mediciones de dureza, gomosidad y masticación; mientras que el esfuerzo de corte Warner Bratzler tiene una correlación muy baja con la terneza sensorial (Choe *et al.*, 2016).

Microscopía Electrónica (SEM)

La microestructura de las muestras analizadas se presenta en la Figura 1. En las imágenes se pueden apreciar diferencias en la estructura de las fibras, en general se observan más espacios entre los haces de las fibras que claramente incrementan su tamaño conforme transcurre el tiempo de almacenamiento en las muestras que se trataron con ultrasonido.

En las muestras C0 y U0 la estructura de las fibras se observa organizada. Sin embargo, en las muestras C se observan que el endomisio y perimisio de los fascículos de las fibras musculares es más grueso que en las muestras U y los fascículos de las fibras en las muestras con ultrasonido son más delgados. En el músculo el colágeno es un componente del tejido conectivo intramuscular que se ha relacionado con la textura de la carne, su estabilidad se relaciona con los enlaces cruzados de las fibras de colágeno (Lawrie, 2006). En este sentido Chang *et al.* (2012) consideraron que el ultrasonido puede causar ruptura en la estructura física del colágeno probablemente asociado a la desnaturaliza-

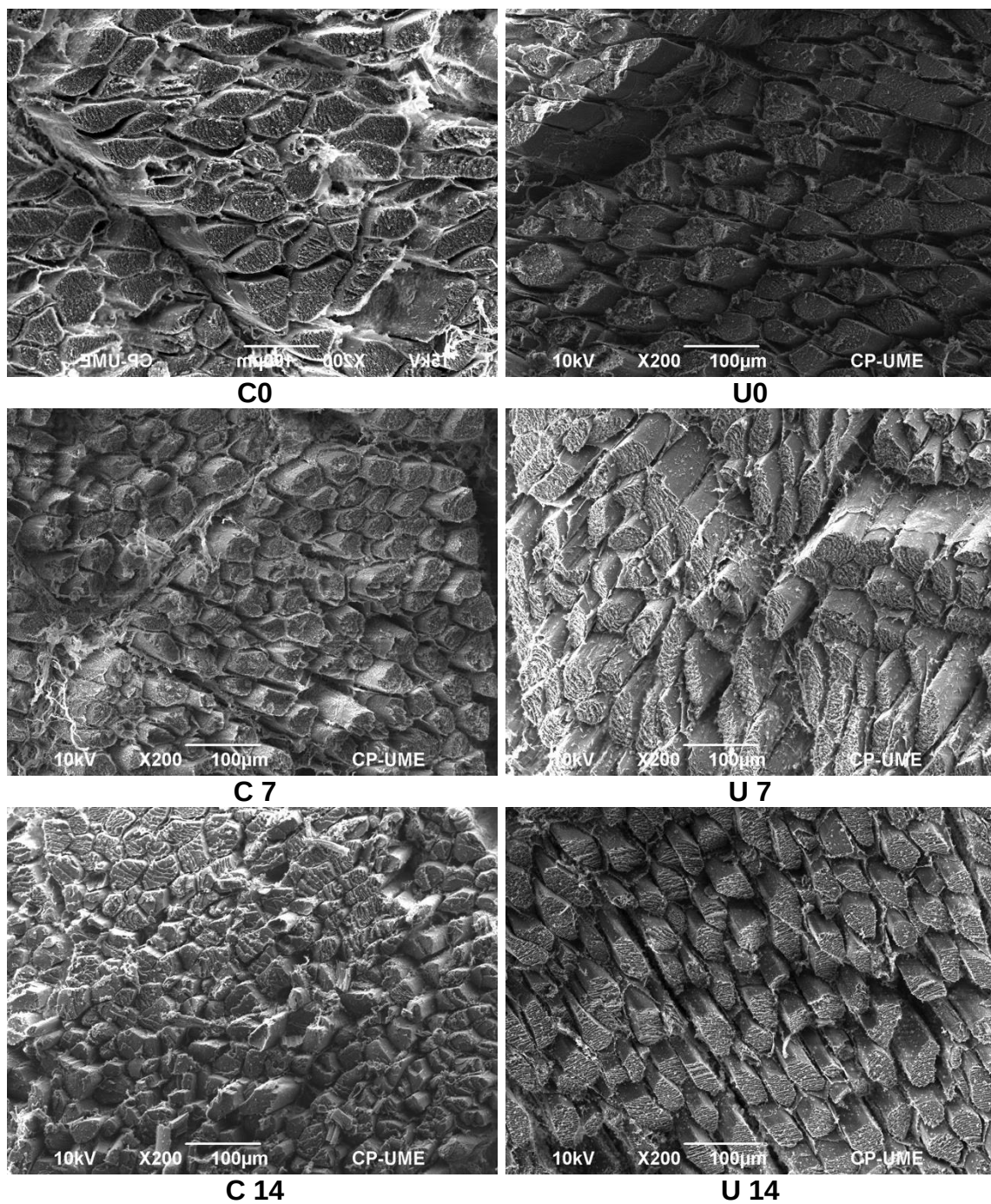


Figura 1. Micrografías (SEM) de la carne de bovino m. *Longissimus dorsi* con (U) o sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y 0, 7 y 14 d de almacenamiento a 4° C

ción y encogimiento de las fibras de colpageno durante la ecografía. Aunque existen otros factores que pueden estar relacionados con la separación de las fibras como puede ser la congelación de la carne, como lo reportó Qui *et al.* (2012) al observar una desintegración de las miofibrillas, interrupción del endomisio y una estructura muscular más suelta por la formación de cristales de hielo y su consecuente derretimiento.

La estructura de la fibra cambió conforme avanzó el tiempo de almacenamiento, observando que las muestras U7 y U14 reducen el tamaño de los fascículos de las fibras, además un marcado espacio entre ellos se presenta en las muestras U14 opuesto a la compactación de las fibras que se observa en C14. Se observa que el endomisio es más delgado en las muestras U14 aunque la organización de las fibras musculares no se pierde. Investigaciones anteriores han sugerido el efecto del ultrasonido sobre la estructura miofibrilar (Ozuna *et al.*, 2013).

Se conoce también efecto del ultrasonido en la transferencia de masas que ayudó en la difusión y penetración más uniforme de la salmuera a la carne como lo han reportado (Leal-Ramos *et al.*, 2011; McDonnell *et al.*, 2014; González-González *et al.*, 2017), en donde presiones positivas y negativas se presentan con la misma frecuencia en la aplicación del ultrasonido por lo que la entrada de la solución a la matriz del alimento ocasiona un aumento de solutos.

Un efecto importante de la sonicación es la cavitación acústica (Ozuna *et al.*, 2013; Chandrapala *et al.*, 2015), en la que se observa la implosión asimétrica de burbujas en la periferia de la superficie de las muestras con la consecuente

producción de microjets que chocan en las muestras y provocan cambios en la estructura de la carne, como se observó en este estudio.

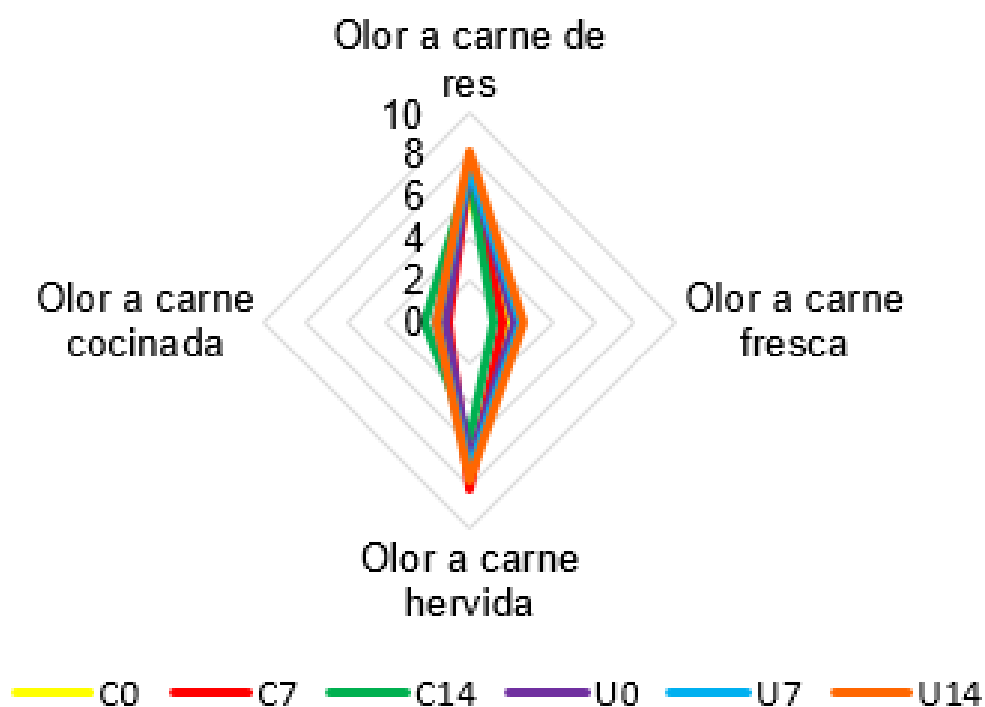
Análisis Sensorial

Los efectos del ultrasonido, tiempo de almacenamiento y su interacción difieren significativamente en el olor de la carne ($P < 0,05$; Gráfica 14). Las muestras U fueron percibidas con mayor intensidad de olor a carne de res (7.79) con respecto a las muestras C (7.00), esta misma percepción se reportó en las muestras a los 14 d de almacenamiento, mientras que las muestras del día 0 de almacenamiento fueron las que presentaron menor intensidad del olor.

Con respecto al atributo “olor a carne fresca” se encontró diferencia significativa ($P < 0,05$) por interacción de los factores evaluados, en general la carne C a cualquier tiempo de almacenamiento fue percibida con menor intensidad para este atributo, encontrándose la menor intensidad en las muestras C14 (1.09), en contraposición a este resultado las muestras U14 fueron percibidas por el panel con la mayor intensidad a carne fresca (2.62).

En el atributo “olor a carne hervida” se observaron diferencias significativas por interacción de factores evaluados ($P < 0,05$) el panel sensorial evaluó las muestras C7 con mayor intensidad de carne hervida (8.21) mientras que las muestras C14 fueron consideradas con la menor intensidad en este mismo descriptor (5.74).

Al evaluar el atributo olor a carne cocinada los resultados de la evaluación sensorial mostraron diferencia significativa ($P < 0,05$) por interacción de factores, los panelistas consideraron que las muestras C14 presentan mayor intensidad de



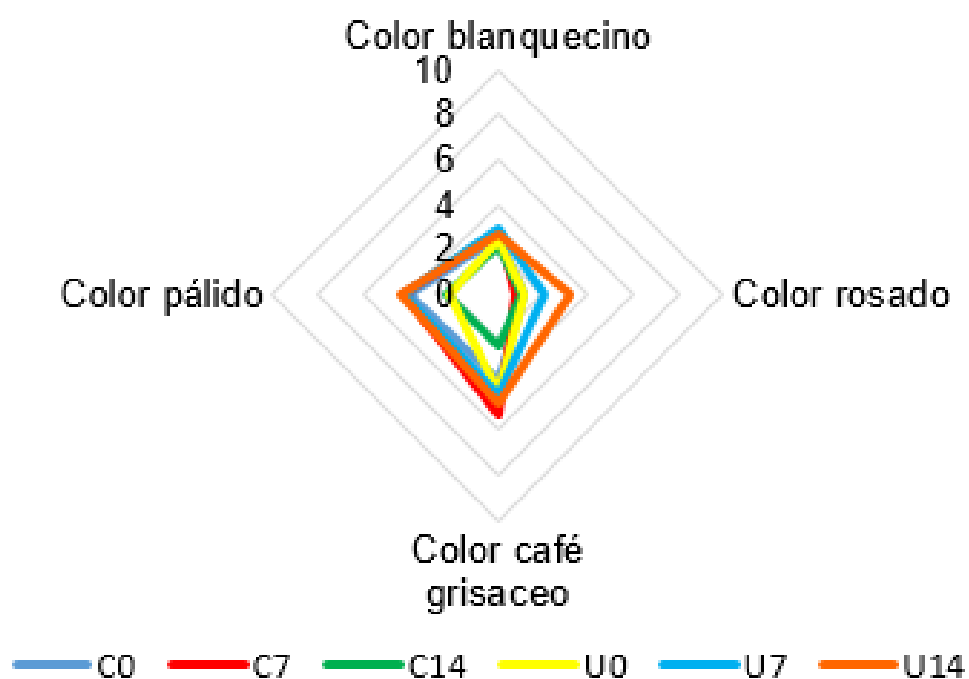
Gráfica 14. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en los descriptores del olor (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. C0= control (sin ultrasonido, 0 días de almacenamiento); C7= control (sin ultrasonido, 7 días de almacenamiento), C14= control (sin ultrasonido, 14 d de almacenamiento); U0= ultrasonido, 0 días de almacenamiento; U7= ultrasonido, 7 días de almacenamiento; U14= ultrasonido, 14 días de almacenamiento.

olor a carne hervida, mientras que las muestras evaluadas con menor intensidad de olor a carne cocinada fueron las C7.

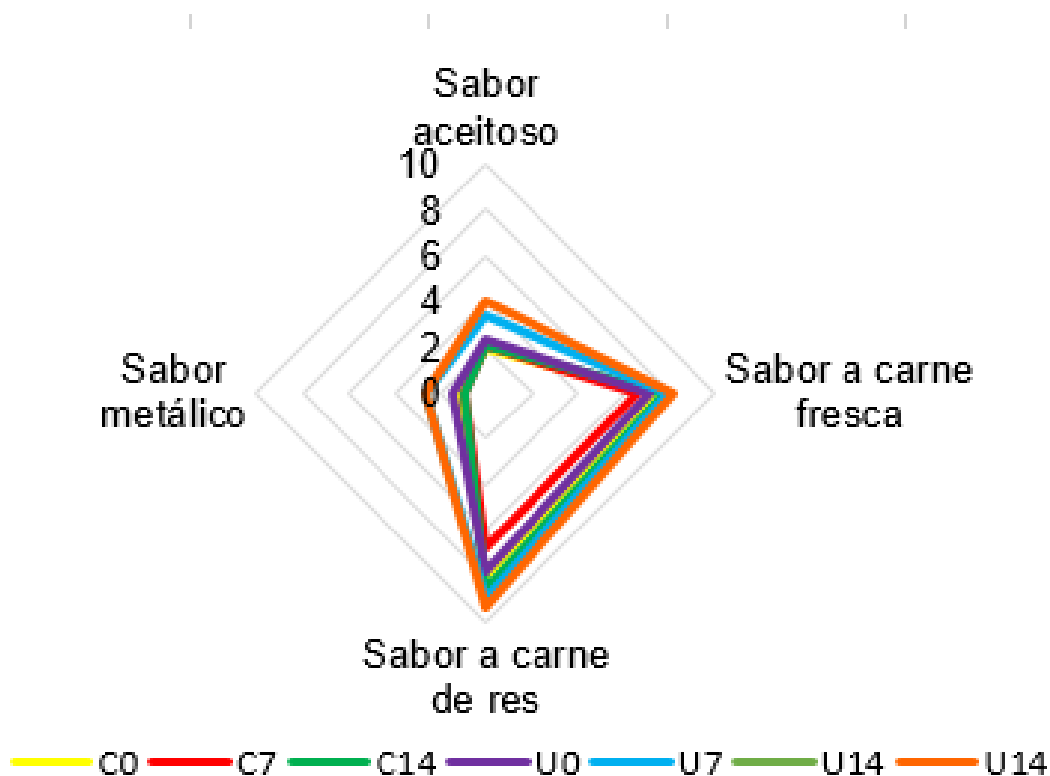
Los resultados del color de la carne obtenidos de la evaluación sensorial mostraron diferencias significativas ($P < 0,05$) por interacción de ultrasonido y tiempo de almacenamiento (Gráfica 15). En general, las muestras U a cualquier tiempo de almacenamiento evaluado fueron consideradas por el panel con mayor intensidad de color rosa considerándose que las muestras U14 tienen mayor intensidad de color rosado (3.18), mientras que las muestras C fueron percibidas con menor intensidad (0.85) para este atributo.

Así mismo, las muestras U a cualquier tiempo de almacenamiento fueron evaluadas con valores de intensidad altos para el color “café grisáceo”. Sin embargo, la muestra que resultó con mayor intensidad de este descriptor fue C7 (5.34) y la muestra evaluada con menor intensidad fue la C14 (4.24). Las muestras U0 (2.10) y C14 (2.33) fueron evaluadas por el panel con valores bajos de intensidad de color pálido, mientras que la muestra percibida con mayor intensidad para este descriptor fue U14 con valores de 4.35.

La percepción del panel sensorial para el atributo sabor determinó diferencias significativas ($P < 0,05$) por ultrasonido y tiempo de almacenamiento en el descriptor sabor aceitoso (Gráfica 16). Las muestras de carne tratadas con U se percibieron con mayor intensidad de sabor aceitoso (3.25) comparado con las muestras C (2.02), por otra parte, las muestras almacenadas por 14 d también fueron evaluadas como las más intensas en sabor aceitoso (3.07) de todos los periodos de almacenamiento evaluados ($P < 0,05$).



Gráfica 15. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en los descriptores del color (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. C0= control (sin ultrasonido, 0 días de almacenamiento); C7= control (sin ultrasonido, 7 días de almacenamiento); C14= control (sin ultrasonido, 14 d de almacenamiento); U0= ultrasonido, 0 días de almacenamiento; U7= ultrasonido, 7 días de almacenamiento; U14= ultrasonido, 14 días de almacenamiento.



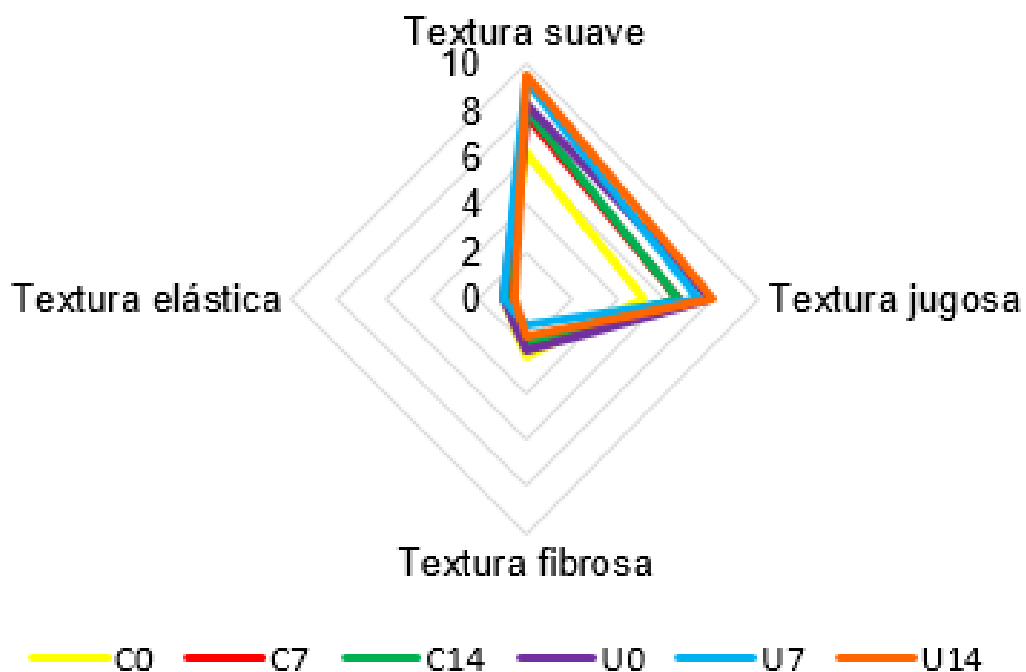
Gráfica 16. Efecto del ultrasonido y tiempo de almacenamiento en los descriptores del sabor (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. C0= control (sin ultrasonido, 0 días de almacenamiento); C7= control (sin ultrasonido, 7 días de almacenamiento); C14= control (sin ultrasonido, 14 d de almacenamiento); U0= ultrasonido, 0 días de almacenamiento; U7= ultrasonido, 7 días de almacenamiento; U14= ultrasonido, 14 días de almacenamiento.

Una mayor intensidad de sabor a carne de res fue percibida en muestras U14 (9.35) mientras que las muestras evaluadas con menor intensidad fueron las C7 (6.79). Los panelistas percibieron mayor intensidad de “sabor metálico” en las muestras U a cualquier tiempo de almacenamiento, comparado con las muestras C.

Los resultados de la textura evaluada sensorialmente se muestran en la Gráfica 17. Una diferencia significativa por factores ultrasonido y tiempo de almacenamiento fue observada en el descriptor “textura suave” ($P < 0,05$). Las muestras U en los periodos de almacenamiento 7 y 14 fueron evaluadas por el panel con una intensidad de textura suave mayor a las muestras C en los mismos periodos de almacenamiento.

Por otra parte, se observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) por la interacción de los factores evaluados (ultrasonido y tiempo de almacenamiento) en el descriptor “textura jugosa” (Gráfica 17). Al evaluar este descriptor el panel consideró que, en general, las muestras U tienen valores de intensidad más altos a cualquier tiempo de almacenamiento, siendo la muestra del día 14 la que se encontró con mayor jugosidad (8.05), opuesto a este resultado las muestras C a cualquier periodo de almacenamiento se percibieron con menor intensidad de textura jugosa siendo la muestra del día 0 la que se evaluó con menor jugosidad en la textura.

La evaluación del atributo “textura fibrosa” mostró diferencias significativas ($P < 0,05$) por efecto de ultrasonido y tiempo de almacenamiento (Gráfica 17). En general, la carne C fue apreciada con mayor intensidad de “textura fibrosa” (2.13)



Gráfica 17. Efecto del tratamiento y tiempo de almacenamiento en los descriptores de la textura (Media $\pm$ E. E.) en muestras de m. *Longissimus dorsi* de bovino con (U) y sin (C) ultrasonido (40 kHz, 11 W/cm²) y almacenadas a 4 °C por 0, 7 y 14 d. C0= control (sin ultrasonido, 0 días de almacenamiento); C7= control (sin ultrasonido, 7 días de almacenamiento), C14= control (sin ultrasonido, 14 d de almacenamiento); U0= ultrasonido, 0 días de almacenamiento; U7= ultrasonido, 7 días de almacenamiento, U14= ultrasonido, 14 días de almacenamiento.

comparada con la carne U. Este comportamiento se observó en la carne del tiempo de almacenamiento 0 en donde se asignaron los valores más altos para la “textura fibrosa”; no obstante, conforme transcurre el tiempo de almacenamiento los valores de intensidad para este descriptor van disminuyendo.

Los descriptores que no mostraron diferencias significativas ($P>0,05$) después de la evaluación del panel fueron los atributos; “color blanquecino”, “sabor a carne fresca” y “textura elástica”. La evaluación sensorial de los alimentos se lleva a cabo mediante un proceso oral de humectación, triturado y formación de bolo que permite percibir las características del producto mediante un proceso físico (Caine *et al.*, 2003) y de una forma dinámica en la que al tiempo que se mastica, se perciben notas de olor y se aprecian sonidos característicos del alimento evaluado (Stokes *et al.*, 2013).

Los resultados en este estudio muestran que la exposición al ultrasonido de alta intensidad aumentó los valores de intensidad de los atributos sensoriales que resultan de la proteólisis, tal es el caso del olor y sabor que fueron evidentes en los descriptores olor a carne cocinada y sabor a carne de res que incrementaron su intensidad conforme transcurrió el periodo de almacenamiento. Los resultados descritos por Pholman *et al.* (1997b) indicaron que la intensidad de sabor evaluada mediante panel sensorial se vio disminuida en muestras (m. *pectoralis* y m. *Longissimus thoracis*) tratadas con ultrasonido (20 kHz, 1000 W/cm²) almacenadas en refrigeración.

El desarrollo del olor y sabor de la carne están relacionados principalmente a dos factores el proceso de cocción y componentes característicos de la especie

que se derive (Toldrá y Flores, 2004) en éste sentido existen compuestos que juegan un rol importante en el aroma y sabor de la carne; los compuestos sulfuro contribuyen al aroma de la carne, los aldehídos favorecen al aroma de la grasa, pirrolina y tiazol producen el característico aroma asado y 2-cetonas el olor a rancidez y notas afrutadas.

En el sabor los compuestos importantes son los aminoácidos, péptidos, ácidos como hipoxantina, láctico, inosínico, ortofosfórico, azúcar, sodio, sal de glutamato y ácido aspártico. Otros compuestos como la carnosina, triglicéridos y ciertos ácidos aminos contribuyen a la sensación del sabor general en la boca (Gorraiz *et al.*, 2002).

Los atributos de color y textura también se ven influenciados por la proteólisis de la carne a causa de la exposición a ultrasonido de alta intensidad y el almacenamiento, de tal forma que los panelistas caracterizaron las muestras con más intensidad de color café grisáceo y pálido, mientras que en la medición instrumental los resultados del color indicaron una tendencia de la carne al color amarillo en el último periodo de almacenamiento. Las investigaciones previas no son concluyentes con respecto a los resultados del color y textura en la carne por su parte Hai-Jun *et al.* (2012) evaluaron filetes de carne bovina (*Semitendinosus*) sometidos a seis periodos de sonicación (40 kHz, 1500 W durante 30 min) indicando que el ultrasonido no tuvo efecto sobre los parámetros de color como la luminosidad y tendencia al rojo mientras que la tendencia al amarillo se vio disminuida.

Por otra parte, la calidad de la carne depende de características como la apariencia, textura y jugosidad que son deseables por los consumidores (Gambuteanu *et al.*, 2013a), en este estudio una textura más suave y jugosa se evaluó en la carne sonicada por los panelistas, estos resultados se relacionan con las mediciones instrumentales de esfuerzo de corte y perfil de textura que reportaron la misma tendencia. Las variables fisicoquímicas como el pH y la capacidad de agua tienen influencia directa en la terneza de la carne, cuando los valores de pH disminuyen se incrementa la capacidad de retención de agua debido a que se incrementa la solubilidad de las proteínas musculares (Hai-Jun *et al.*, 2012); otro factor que de forma convencional influye en los cambios de textura es la maduración de la carne mediante la acción del proceso enzimático de desnaturalización de proteínas.

El empleo del ultrasonido de alta intensidad en diversos procesos es considerado cada vez más por la industria alimentaria como una herramienta que permite mejorar y conservar las características de calidad, nutricionales y sensoriales de los alimentos en los que se ha investigado y las tendencias del consumidor por alimentos inocuos y de calidad (Arvanitoyannis *et al.*, 2017).

Una de las ventajas en esta metodología es su carácter no destructivo que ofrece a la industria la posibilidad de explorar la composición de los alimentos, la combinación con otras metodologías y ser amigable con el medio ambiente.

Hasta ahora las investigaciones con respecto a los efectos del ultrasonido probados en diferentes matrices y procesos han indicado efectos positivos que mejoran los productos y agilizan los procesos en los que se aplicó, así mismo

contribuye a reducir tiempos y costos, sin embargo, hasta ahora estos estudios se han conducido a nivel de laboratorio y para lograr su aplicación en la industria es necesario realizar más investigación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio la carne de bovino tratada con ultrasonido fue más luminosa y menos roja, con mayor pérdida por goteo sin afectar el pH, la CRA y se puede considerar que las variables fisicoquímicas no sufrieron efectos negativos.

El perfil de textura de la carne de bovino tratada con ultrasonido mostró menor dureza. El esfuerzo de corte en la carne de bovino tratada con ultrasonido fue menor.

La microestructura de la carne sonicada presentó mayor espacio entre fibras y entre haces musculares y mayor degradación del tejido conectivo posiblemente relacionado con la textura de la carne.

La evaluación sensorial es una herramienta que permite la valoración de la carne, complementándose con las medidas instrumentales y fisicoquímicas que en este estudio no sufrieron efectos negativos por la aplicación de ultrasonido de alta intensidad.

Los resultados de este estudio corroboraron que el ultrasonido puede ser utilizado como una herramienta en el ablandamiento de la carne a escala de laboratorio y se tiene ya suficiente información para evaluar su aplicación como agente ablandador a escala piloto.

Se recomienda realizar estudios relacionados con la aceptación del consumidor final de la carne de bovino tratada con ultrasonido para complementar su evaluación.

LITERATURA CITADA

- Álvarez, D., Y. L. Xiong, M. Castillo, F. A. Payne y M. D. Garrido. 2012. Textural and viscoelastic properties of pork frankfurters containing canola olive oils, rice bran, and walnut. *Meat Sci.* 92:8-15.
- AMSA. 1995. American meat science association. Research guidelines for cooker, sensory evaluation and instrumental tenderness measurements of fresh meat. National Livestock and Meat Board Chicago, Ill.
- Arvanitoyannis, I. S., K. V. Kotsanopoulos y A. G. Savva. 2017. Use of ultrasound in the food industry methods and effects on quality safety and organoleptic characteristics of foods: A review. *Crit. Rev. Food Sci.* 57:109-128.
- Boistier-Marquis, E., N. Lagsir-Oulahal, M. Callard. 1999. Applications des ultrasons de puissances en industries alimentaires, *Ind. Aliment. Agric.* 116:23– 31.
- Bourne, M.C. 1978. Texture Profile Analysis. *Food Technol.* 32:62-72.
- Caine, W. R., J. L. Aalhus, D. R. Best, M. E. R. Dugan y L. E. Jeremiah. 2003. Relationship of texture profile analysis and warner Bratzler shear force with sensory characteristics of beef rib steaks. *Meat Sci.* 64: 333-339.
- Caraveo, O., A. D. Alarcón-Rojo, A. Renteria, E. Santellano, L. Paniwnyk. 2015. Physicochemical and microbiological characteristics of beef treated with high-intensity ultrasound and stored 4 °C. *J. Sci. Food Agr.* 95:2487-2493.
- Cárcel, J. A., J. Benedito, J. Bon y A. Mulet. 2007. High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Sci.* 76: 611-619.
- Chandrapala, J. 2015. Low intensity ultrasound applications on foods systems. *Int. Food Res. J.* 22: 888-895.
- Chang H. J, Wang Q., Tang C. H. and Zhou G.H. 2015. Effects of ultrasound treatment on connective tissue collagen and meat quality of beef semitendinosus muscle. *J. Food Qual.* 38:256–267
- Choe J.H., M.H. Choi, M.S. Rhee, B.Ch. Kim. 2016. Estimation of sensory pork loin tenderness using Warner-Bratzler shear force and texture profile analysis measurements. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 29:1029-1036.
- Demirdöven, A. y T. Baysal. 2009. The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Rev.* 25:1-11.
- Dolatowski, Z., D. M., Stasiak y A. Latoch. 2000. Effect of ultrasound processing of meat before freezing on its texture after thawing. *Electr J Polish Agric Univer*, 3(2)

- Drasfield, E. 1994. Tenderness of meat, poultry and fish. En Quality attributes and their measurement in meat, poultry and fish products. Pearson A. M. y T. R. Dutson, eds. Blackie Academic, London, UK.
- Grau R. y R. Ham 1953. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Wasserbindung im Mukel. Naturwissensschaften. 40:29
- Got, F., J. Culioli, P. Berge, X. Vignon, T. Astruc, J. M. Quideau y M. Lethiecq. 1999. Effects of high-intensity high-frequency ultrasound on ageing rate, ultrastructure and some physico-chemical properties of beef. Meat Sci. 51:35-42.
- Gambuteanu C. y P. Alexe. 2013a. Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological chemical and technological properties of unpackaged pork *Longissimus dorsi*. The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. 37:98-107.
- Gambuteanu, C., V. Filimon y P. Alexe. 2013b. Effects of ultrasound on technological properties of meat a review. Ann. Food Sci. Technol. 2:176-182.
- González-González, L., Luna-Rodríguez, L. M. Carrillo-López, A. D. Alarcón-Rojo, I. A. García-Galicia y R. Reyes-Villagrana. 2017. Ultrasound as an alternative to conventional marination: acceptability and mass transfer. J. Food Qual.
- Gorraiz, C., M. J. Beriain, J. Chasco y K. Insausti. 2002. Effect of aging time on volatile compounds odor and flavor of cooked beef from pirenaica and friesian Bulls and heifers. J. Food Chem. and Toxicology. 67:916-922.
- Hai-Jun, Ch., X. Xing-Lian y Z. Guang-Hong. 2012. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef Semitendinosus muscle during ultrasonic processing. Acta Sci. Pol., Technol. Aliment. 5: 285-297.
- Hernando, I., E. Llorca, A. Puig y M. A. Llunch. 2010. Microestructure. In Handbook of seafood and seafood products analysis. Nollet, L. M. L. y F. Toldrá, eds. CRC Press Boca Ratón, USA
- Honikel, K. O. y C. J. Kim 1986. Causes of the development of PSE pork. Fleischwirsch. 66:349-351
- Huff-Lonergan, E. y S. M. Lonergan. 2005. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. Meat Sci. 71:194-204.
- Hutchings, J. B. 1999. Food color and appearance. Blackie Academic & Professional. Bishopbriggs, Glasgow.

- Jayasooriya, S. D., B. R. Bhandari, P. Torley y B. R. D'Arcy. 2004. Effect of high power ultrasound wave son properties of meat: a review. *Int. J. Food Prop.* 2:301-319.
- Jayasooriya, S. D., P. J. Torley, B. R. D'Arcy y B. R. Bhandari. 2007. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine Semitendinosus and Longissimus muscle. *Meat Sci.* 75. 628-639.
- Judge, M. D., E. D. Aberle, J. C. Forrest, H. B. Hedrick y R. A. Merkel. 1989. *Principles of Meat Science*. Kendall Hunt Publishing Company. United States of America.
- Kang, Da-cheng; Gao, Xue-qin; Ge, Qing-feng; Zhou, Guang-hong y Zhang Wang-gang. 2017. Effects of ultrasound on the beef structure and water distribution during curing through protein degradation and modification. *Ultrason. Sonochem.* 38:317-325.
- Kuehni, R. G. 1996. *Color. An introduction to practice and principles*. Wiley Interscience. Nueva York.
- Lawrie R. A. y Ledward, D. A. 2006. *Lawrie's Meat Science* (7th edn). CRC/Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 98–103.
- Leal-Ramos, M. Y., A. D. Alarcón-Rojo, T. J. Mason, L. Paniwnyk y M. Alarjah. 2011. Ultrasound-enhances mass transfer in halal compared with non-halal chicken. *J. Sci. Food Agric.* 91:130-133.
- Lian, T., L. Wang, y Y. Liu. 2013. A New Insight into the Role of Calpains in Post-mortem Meat Tenderization in Domestic Animals: A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences.* 26:443–454.
- Mandour, H. A., M. Bashari, C. Lagnika, Q. He y H. Sun. 2014. Effect of ultrasound treatment prior to vacuum and modified atmosphere packaging on microbial and physical characteristics of fresh beef. *J. Food Nutr. Res.* 6:312-320.
- Margulis, M. A. y L. M. Margulis. 2003. Calorimetric method for measurement of acoustic power absorbed in a volume of a liquid. *Ultrason. Sonochem.* 10: 343-345.
- McDonnell, C. K., P. Allen, C. Morin y J. G. Lyng. 2014. The effect of ultrasonic salting on protein and water protein interactions in meat. *Food Chem.* 147: 245-251.
- Ozuna, C., A. Puig, J. V. García-Pérez, A. Mulet y J. A. Cárcel. 2013. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat *Longissimus dorsi* brined at different NaCl

- concentrations. J Food Eng. 119:84–93.
- Offer, G. y P. Knight. 1988. The structural basis of water-holding capacity in meat. Part 1: general principles and water uptake in meat processing. Pages 61-171 in Developments in meat science. R. Lawrie. ed. Elsevier Applied Science, New York.
- Owens, C. M., Z. Alvarado, y A. R. Sams. 2010. Poultry meat processing. 2nd ed. CRC, Press, Boca Raton, FL.
- Patist, A. y D. Bates. 2008. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. Innovative Food Sci. Emerging Technol. 9:147-154.
- Pohlman, F. W., M. E. Dikeman y D. H. Kropf. 1997a. Effects of high intensity ultrasound treatment, storage time and cooking method on shear, sensory, instrumental color and cooking properties of packaged and unpackaged beef pectoralis Muscle. Meat Sci. 46: 89-100.
- Pohlman, F. W., M. E. Dikeman, J. F. Zayas y J. A. Unruh. 1997b. Effect ultrasound and convection cooking to different and point temperatures on cooking characteristics, shear force and sensory properties, composition, and microscopic morphology of beef *longissimus* and *pectoralis* muscle. J. Anim. Sci. 75:386-401.
- Petracci, M., L. Laghi, P. Rocculi, S. Rimini, V. Panarese, M. A. Cremonini, y C. Cavani. 2012. The use of sodium bicarbonate for marination of broiler breast meat. Poult. Sci. 91:526-534.
- Ruiz de Huidobro F., Miguel E., Blázquez B. y Onega E. 2005. A comparison between two methods (Warner–Bratzler and texture profile analysis) for testing either raw meat or cooked meat. Meat Sci. 69:527-536.
- SAS, Institute. 2006. SAS/STAT User's Guide. SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA.
- Sikes, A. L., R. Mawson, J. Stark y R. Warner. 2014. Quality properties of pre- and post-rigor beef muscle after interventions with high frequency ultrasound. Ultrason Sonochem. 21: 2138-2143.
- Siró, I., C. Vén, C. Balla, G. Jónas, I. Zeke y L. Friedrich. 2009. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. J. Food Eng. 91: 353-362.
- Smith, N. B., J. E. Cannon, J. E. Novakofski, F. K. McKeith y W. D. O'Brien Jr. 1991. Tenderization of *Semitendinosus* muscle using high intensity ultrasound. Ultrasound Symp. 1371-1374.

- Stadnik, J. 2008. Influence of sonication on the oxidative stability of beef. *Roczniki Instytutu Przemysłu Miesnego i Tłuszczowego*, 47:63-68.
- Stadnik, J. y Z. J. Dolatowski. 2011. Influence of sonication on Warner-Bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (m. Semimembranosus). *Eur. Food Res. Technol.* 233: 553-559.
- Stokes, J. R., M. W. Boehm y S. K. Baier. 2013. Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond. *Current Opinion in Colloid & Interface Science.* 18:349-359.
- Stone, H., J. Sidel, S. Oliver, A. Woolsey y R. C. Singleton (Ed.) 2004. "Sensory Evaluation by quantitative Descriptive Analysis, in Descriptive Sensory Analysis in Practice". Food & Nutrition Press. Connecticut, USA.
- Toldrá, F., y M. Flores. 2004. Analysis of meat quality. *Handbook of food analysis: methods, instruments and applications*. Nollet. L. M. L., 2 ed., Volume 3. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton.
- Wyszecki, G. 1967. *Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulation*. Wiley Interscience. Nueva York.
- Zhao, Y. Y., P. Wang, Y. F. Zou, K. Li, Z. L. Kang, X. L. Xu, y G. H. Zhou. 2014. Effect of pre-emulsification of plant lipid treated by pulsed ultrasound on the functional properties of chicken breast myofibrillar protein. *Food Res. Int.* 58: 98-104.
- Zhuo, G. H., X. L. Xu y Y. Liu. 2010. Preservation technologies for fresh meat – A review. *Meat Sci.* 86: 119-128.