

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN EL MARINADO DE CARNE: EVALUACIÓN DE
UN PROCESO DE MARINADO ULTRASÓNICO ASISTIDO CON ENZIMAS
ABLANDADORAS EN ARRACHERA DE *Bos taurus* L., EFECTO EN EL
RENDIMIENTO, TEXTURA Y COLOR

POR:

WILIAM GERARDO CORONADO SÁNCHEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
MANEJO Y APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE RECURSOS BIOTICOS

TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN EL MARINADO DE CARNE: EVALUACIÓN DE
UN PROCESO DE MARINADO ULTRASÓNICO ASISTIDO CON ENZIMAS
ABLANDADORAS EN ARRACHERA DE *Bos taurus* L., EFECTO EN EL
RENDIMIENTO, TEXTURA Y COLOR

Comité de Tesis



Dr. Carlos Abel Amaya Guerra

Director de Tesis



Dr. Juan Gabriel Báez González

Secretario



Dra. Sandra Loruhamá Castillo Hernández

Vocal



Dra. Minerva Bautista Villarreal

Vocal



Dra. Mayra Zulema Treviño Garza

Vocal



Dra. Katiushka Arevalo Niño



SUBDIRECCIÓN
DE POSGRADO

Subdirector de posgrado

TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN EL MARINADO DE CARNE: EVALUACIÓN DE
UN PROCESO DE MARINADO ULTRASÓNICO ASISTIDO CON ENZIMAS
ABLANDADORAS EN ARRACHERA DE *Bos taurus* L., EFECTO EN EL
RENDIMIENTO, TEXTURA Y COLOR

Dirección de Tesis



Dr. Carlos Abel Amaya Guerra

Director de Tesis

DERECHOS RESERVADOS©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta Tesis está protegido, el uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material contenido que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo mencionando al autor o autores.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y al Dr. Carlos Abel Amaya Guerra, por los recursos económicos y tecnológicos otorgados para la realización de este trabajo. A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ciencias Biológicas y el Departamento de Alimentos por la oportunidad de desarrollar este proyecto y de ampliar mis horizontes académicos y profesionales.

DEDICATORIAS

Siempre agradeceré el apoyo y amor incondicional de mi familia, que ha sido mi mayor motivación.

Obras como esta no son posibles sin el respaldo de quienes creen en mí, en cada paso del camino.

Por cada momento difícil, por cada desafío, por cada aprendizaje, me siento más fuerte y agradecido.

Agradezco a mis amigos por ser una constante fuente de ánimo y por recordarme que todo es posible.

Y a mis profesores, quienes compartieron su conocimiento y su pasión, sembrando en mí la semilla del saber.

Aunque el esfuerzo ha sido grande, siempre hubo una razón para seguir adelante, y esa razón fue su apoyo.

Se que este logro es el reflejo del trabajo conjunto, de las ganas de aprender y crecer.

Obsesionado con el conocimiento, pero también con el agradecimiento a quienes me han acompañado en este camino.

“Le même sentiment de décalage, de futilité, où que j’aïlle: je feins de m’intéresser à ce qui ne m’importe pas, je m’active machinalement ou par charité, sans jamais être vraiment impliqué, sans jamais être vraiment quelque part. Ce qui m’attire est ailleurs, et je ne sais pas où se trouve cet ailleurs.” - Emil Ciorán

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1 <i>Bos taurus</i>	3
2.2 Arrachera.....	4
2.3 Consumo de carne y arrachera en México.....	4
2.4 Marinado.....	5
2.5 Marinado por tumbleado	6
2.6 Inconvenientes del marinado por tumbleado	6
2.7 Ultrasonido.....	7
2.8 Marinado por ultrasonido	9
2.9 Efectos del marinado ultrasónico en carne de res	9
2.10 Enzimas.....	10
2.11 Marinado enzimático y ultrasonido	11
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. HIPÓTESIS	14
5. OBJETIVOS.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos	15
6 METODOLOGÍA	16
6.1 Lugar de trabajo	16
6.2 Obtención de materia prima.....	16
6.3 Proceso de marinado	17
6.4 Absorción de Marinado	18

6.5 Capacidad de Retención de Agua (CRA)	19
6.6 Pérdida por Cocción	19
6.7 pH	19
6.8 Color	20
6.9 Análisis de textura	20
6.10 Análisis de fuerza de corte	20
6.11 Análisis estadístico y diseño experimental	21
7. RESULTADOS	23
7.1 Absorción de marinado	23
7.2 Capacidad de Retención de Agua (CRA)	27
7.3 Pérdida por Cocción	31
7.4 pH	35
7.5 Determinación de la diferencia de color	39
7.6 Análisis de Perfil de Textura (TPA)	40
7.7 Análisis de Fuerza de Corte (SF)	48
8. DISCUSIÓN	49
9. CONCLUSIONES	52
10. PERSPECTIVAS	53
11. BIBLIOGRAFÍA	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación taxonómica de <i>Bos taurus</i>	3
Tabla 2. Tratamientos experimentales.....	18
Tabla 3. Representación de las pruebas estadísticas utilizadas	22
Tabla 4. Absorción de marinado en % a 10 minutos para los tratamientos experimentales	23
Tabla 5. Absorción de marinado en % a 20 minutos para los tratamientos experimentales	24
Tabla 6. Absorción de marinado en % a 30 minutos para los tratamientos experimentales	25
Tabla 7. Capacidad de retención de agua expresada como % de retención a 10 min.....	27
Tabla 8. Capacidad de retención de agua expresada como % de retención a 20 min.....	28
Tabla 9. Capacidad de retención de agua expresada como % de retención a 30 min.....	29
Tabla 10. Pérdida por cocción (%) a 10 min	31
Tabla 11. Pérdida por cocción (%) a 20 min	32
Tabla 12. Pérdida por cocción (%) a 30 min	33
Tabla 13. Diferencia de pH a 10 min	35
Tabla 14. Diferencia de pH a 20 min	36
Tabla 15. Diferencia de pH a 30 min	37
Tabla 16. Diferencia de color representada como ΔE para todos los tratamientos experimentales.....	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general de trabajo, elaboración propia.	17
Figura 2. Absorción de marinado en arrachera a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado.	26
Figura 3. Gráfica de Capacidad de Retención de Agua (%) a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado.	30
Figura 4. Pérdida por cocción (%) en arrachera a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado.	34
Figura 5. Gráfica de pH después de marinar a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado.	38
Figura 6. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Dureza 1.	40
Figura 7. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Adhesividad.	41
Figura 8. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Fracturabilidad.	42
Figura 9. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Dureza 2.	43
Figura 10. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Cohesividad.	44
Figura 11. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Elasticidad.	45
Figura 12. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Gomosidad.	46
Figura 13. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Masticabilidad.	47
Figura 14. Gráfica del análisis de Fuerza de Corte.	48

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
ΔE	Métrica para medir la diferencia perceptible entre dos colores
AHDB	La Junta de Desarrollo Agrícola y Hortícola, Agriculture and Development Board, Organismo de Reino Unido
ANOVA	Análisis de Varianza
COMECARNE	Consejo Mexicano de la Carne
CRA	Capacidad de Retención de Agua
CRT	Tratamiento testigo, la carne integra sin ningún cambio
EC	Número de la Comisión de Enzima
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos
g	Gramo
kHz	Kilohertz
LC-ESI-MS/MS	Cromatografía Líquida con Ionización por Electrospray y Espectrometría Tándem
log	Logaritmo
N	Newton, unidad de fuerza
MFI	Índice de Fragmentación de la Miofibrilla
min	Minuto
mJ	MiliJulio
mm	Milimetro
mm/s	Milímetros por segundo
O157:H7	Cepa enterohemorrágica de la bacteria Escherichia coli
ONU	Organización de las Naciones Unidas
pH	Potencial de Hidrógeno
s	Segundos

SDS-PAGE	Técnica de electroforesis para separar y analizar las proteínas cárnicas molecular.
SF	Fuerza de Corte de Warner-Bratzler
TBARS	Sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico
TC	Tratamiento control, marinado en inmersión por 30 min
TEM	Microscopía Electrónica de Transmisión
O157:H7	Cepa enterohemorrágica de la bacteria Escherichia coli
ONU	Organización de las Naciones Unidas
TPA	Análisis de Perfil de textura
TT	Tratamiento tumbleado, tumbleado por 30 min
U/mL	Unidad internacional (U) de actividad enzimática por mililitro (mL) de un
UFC/mL	Unidades formadoras de colonias por mililitro
UPS	Ultrasonido asistido con papaína
US	Tratamiento con ultrasonido
USB	Ultrasonido asistido con bromelina
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
W	Watt
W/cm ²	Watts por centímetro cuadrado
W/m ²	Watts por metro cuadrado
WHC	Water Holding Capacity, Capacidad de Retención de Agua

RESUMEN

Se evaluó la viabilidad de utilizar una combinación de marinado ultrasónico asistido con enzimas (papaína y bromelina) en arrachera de res. El objetivo principal fue determinar si este método mejora el rendimiento (Capacidad de Retención de Agua, Pérdida por Cocción y Absorción de Marinado), la textura (Análisis de Perfil de Textura y Fuerza de Corte) y el color de la carne en comparación con el marinado por tumbleado. Evaluando varias formulaciones de tratamiento, potencias (300W y 480 W) y tiempos (10, 20 y 30 min), los resultados mostraron que el tratamiento con ultrasonido asistido con bromelina por 10 min a 300 W (USB-300W-10) fue el más eficaz. solo 10 minutos, este método logró una absorción de marinado de 12.85 ± 2.08 % similar a la del tumbleo de 16.68 ± 3.68 % por 30 minutos, exhibiendo también una mayor capacidad de retención de agua de 84.84 ± 2.95 y sin cambios significativos en el color. Sin embargo, a pesar de la mayor retención de agua, estos tratamientos también mostraron una mayor pérdida por cocción, en USB-300W-10 de 40.38 ± 1.76 % frente al tumbleado de 23.21 ± 2.29 %, que se justifica debido a una mayor degradación de las fibras musculares. En cuanto a la textura, el tratamiento USB produjo los valores más bajos en dureza 1 y 2, 6.47 ± 1.40 N y 5.02 ± 1.17 N respectivamente, además de la menor fuerza de corte con un valor de 4.67 ± 0.9 N, lo que indica una mejora significativa en la ternura de la carne. En conclusión, este estudio confirma que el uso combinado de ultrasonido y enzimas en el marinado es una alternativa más eficiente que solamente usar ultrasonido o tumbleado en la arrachera.

ABSTRACT

This study evaluated the feasibility of using a combination of enzyme-assisted ultrasonic marinating (papain and bromelain) on beef flank steak. The main objective was to determine if this method improves meat yield (Water Holding Capacity, Cooking Loss, and Marinade Absorption), texture (Texture Profile Analysis and Shear Force), and color compared to tumbling marinating. Evaluating various treatment formulations, power levels (300W and 480W), and times (10, 20, and 30 min), the results showed that bromelain-assisted ultrasonic treatment for 10 minutes at 300 W (USB-300W-10) was the most effective. In just 10 minutes, this method achieved a marinade absorption of $12.85 \pm 2.08\%$, like that of tumbling marinating ($16.68 \pm 3.68\%$) for 30 minutes, while also exhibiting a higher water-holding capacity of 84.84 ± 2.95 and no significant changes in color. However, despite greater water retention, these treatments also showed greater cooking loss: $40.38 \pm 1.76\%$ for USB-300W-10 compared to $23.21 \pm 2.29\%$ for tumble drying. This difference is attributed to greater fiber degradation. Regarding texture, the USB treatment produced the lowest values for hardness 1 and 2, 6.47 ± 1.40 N and 5.02 ± 1.17 N, respectively, as well as the lowest shear strength at 4.67 ± 0.9 N, indicating a significant improvement in meat tenderness. In conclusion, this study confirms that the combined use of ultrasound and enzymes in marinating is a more efficient alternative than using only ultrasound or tumble drying.

1. INTRODUCCIÓN

La industria ganadera enfocada a la producción de carne es una de las ramas del sector que se encuentra constantemente en desarrollo debido a que el costo de producción de cualquier tipo de carne es alto en comparación a otro tipo de alimentos, por lo que se han hecho muchos esfuerzos para poder sacarle provecho en su totalidad al animal o bien mejorar el rendimiento de las partes más importantes comercialmente del mismo. Actualmente, la industria cárnica busca constantemente tecnologías para poder mejorar las propiedades de la carne sin perder rendimiento y sin alterar las propiedades nutricionales y sensoriales manteniendo altos estándares de inocuidad. (Ha et al. 2022)

Tomando en cuenta lo anterior, una de las técnicas más simples y eficientes para poder mejorar las propiedades de la carne y su rendimiento es el marinado, el cual se puede definir como el sometimiento de algún tipo de corte de carne a una maceración o inyección con alguna solución que contenga algún ingrediente funcional que mejore las propiedades del alimento como sal, nitritos, sazónadores, aceites y otros durante un tiempo determinado a baja temperatura, para posteriormente empacar los cortes y almacenarlos para su consumo final. El marinado tiene el propósito de brindar un valor agregado a la carne, pero el principal inconveniente de esta técnica es su poca eficiencia de tiempo y dispersión, por lo que se han realizado esfuerzos para poder mejorarla. (Ha et al. 2022)

Por otro lado, el ultrasonido es una tecnología emergente que se encuentra en auge dentro de la industria de los alimentos debido a que mejora significativamente las propiedades sensoriales y la inocuidad de los productos sin ser invasiva a diferencia de otro tipo de tratamientos. (Yusop et al. 2011)

En adición al ultrasonido, las enzimas proteolíticas tienen la capacidad de interactuar con la carne degradando las fibras musculares mejorando la textura, siendo la más popular la papaína y la bromelina, ambas enzimas son aditivos aprobados por

la FDA que son utilizadas comercialmente en muchos sazonadores y ablandadores de carne. (Yusop et al. 2011)

En años recientes, se han desarrollado diferentes estudios en los que se ha encontrado que el marinado asistido por ultrasonido mejora sustancialmente la dispersión de la salmuera y la textura del producto final, pero el efecto combinado de salmuera enzimática y ultrasonido es un área de oportunidad que no ha sido explorada por completo. (Charoux et al. 2017)

2. ANTECEDENTES

2.1 *Bos taurus*

Bos taurus, comúnmente conocido como ganado doméstico o bovino, es un animal de tamaño grande y robusto, con un cuerpo musculoso y bien desarrollado. Las extremidades son fuertes y proporcionadas al cuerpo, permitiendo movimientos ágiles y estables. La cabeza es grande en proporción al cuerpo, con un cráneo ancho y una frente plana. En general, exhibe una morfología adaptada para la vida terrestre, con características que reflejan su función como animal de pastoreo y producción de carne y leche (Álvarez-Romero y Medellín 2005).

Esta especie, cuya clasificación taxonómica se puede apreciar en la tabla 1, es una de las principales fuentes de carne para consumo humano. Las diversas razas han sido criadas y seleccionadas a lo largo del tiempo para producir carne de alta calidad en términos de sabor, ternera y rendimiento, además proporciona una amplia variedad de cortes de carne, que van desde filetes premium hasta cortes menos costosos, lo que permite satisfacer a todo tipo de consumidores (Álvarez-Romero y Medellín 2005).

Tabla 1. Clasificación taxonómica de *Bos taurus*

Reino	Animalia
Phylum	Chordata
Clase	Mammalia
Orden	Artiodactyla
Familia	Bovidae
Género	Bos
Especie	<i>Bos taurus</i>

(USDA 2024)

2.2 Arrachera

La arrachera de res, también conocida como outside skirt o skirt steak en inglés corresponde al músculo *Transversus abdominis*, es un corte de carne que se obtiene de la región abdominal del animal. Específicamente, se encuentra unido a la Falda en la región ventral entre la parte inferior del diafragma y el abdomen, cubriendo parte de las costillas y cartílagos costales. Esta área de la res es conocida por contener músculos que han sido sometidos a un constante ejercicio, lo que le otorga a la arrachera una textura fibrosa pero tierna (Instituto Nacional de Carnes 2023).

Visualmente, la arrachera se distingue por su forma alargada y plana, con fibras musculares claramente visibles. Suele tener un grosor moderado, lo que permite una cocción rápida y uniforme. Posee una capa de grasa que lo cubre, esta debe de ser removida junto al tejido conectivo hasta quedar casi libre de ella (Instituto Nacional de Aprendizaje - Costa Rica 2015).

En cuanto al sabor, la arrachera es reconocida por su rico sabor a carne, con un toque ligeramente dulce y terroso. Su perfil de sabor es bastante robusto, lo que la hace ideal para marinar con una variedad de ingredientes que realcen su gusto natural, sus fibras largas y su capacidad para absorber marinados y sabores adicionales la vuelven ideal para sazonar con especias y hierbas antes de cocinarla (Agriculture and Horticulture Development Board 2019).

2.3 Consumo de carne y arrachera en México

Según datos del Consejo Mexicano de la Carne (2023), el hogar mexicano promedio gasta alrededor de \$1,400 pesos mensuales designados a la compra de proteína cárnica de algún tipo. También se determinó que los 3 estados con mayor consumo de proteína cárnica en general son el Estado de México, la Ciudad de México y Jalisco, mientras que la tendencia específica de consumo de la carne bovina se centraliza en los estados del norte como Nuevo León, Sonora y Baja California, asimismo estos estados también son aquellos que designan un mayor gasto a la compra de carne de res. Se identificó, además, que el gasto de los hogares

se va principalmente al Bistec con un 48.6 % y la carne molida con un 20.2%, mientras que la arrachera posee un 2% de representación del gasto.

Un aspecto importante para considerar dentro de las tendencias de consumo de la carne es la situación específica del área norte de México. La carne asada se ha considerado como una parte fundamental de la gastronomía correspondiente a los estados del norte, Narchi et al. (2015) indica que parte del desarrollo económico del área norte se ha enfocado en promover la producción de los insumos para poder producir carne de res, tanto así que la carne asada se ha vuelto una práctica pública pudiendo encontrar este platillo en restaurantes y puestos ambulantes por toda la zona norte.

Dentro de la zona de Nuevo León y su área metropolitana, la carne asada se considera un elemento cultural y una actividad social. En un estudio elaborado por Alvarado et al. (2016) evaluó la perspectiva de los jóvenes hacia el consumo de carne asada, en dónde se encontró que se considera un tradición dentro de la región totalmente influenciada por la familia y amigos, además de que no se considera el ingreso familiar y el precio de la carne como algún tipo de restricción para no consumirla debido a que se valora más la connotación social dentro de la actividad, afirmando además que es muy común organizarse y cooperar para poder obtener buenos productos sin afectar tanto el bolsillo y a su vez fortalecer los lazos. También, se considera que hay una cantidad abundante de restaurantes enfocados exclusivamente a la carne y parrilladas, en dónde se ofrece arrachera comúnmente teniendo un éxito abundante.

Tomando en cuenta lo señalado anteriormente y la perspectiva de Rodríguez (2009), se puede decir que, aunque la arrachera no es el corte más accesible monetariamente hablando ni el más consumido a escala nacional en el hogar, pero a nivel restaurante llega a tener entre 60 – 70 % de preferencia por parte de consumidores respecto a otros cortes de carne, resaltando así, la importancia económica del corte.

2.4 Marinado

El marinado es un método antiguo para mejorar el sabor y la conservación de carnes. Consiste en sumergir las carnes en un líquido con especias y aditivos, lo que les da sabor y las preserva por más tiempo. Desde el Renacimiento, su objetivo ha sido suavizar la carne y

mantener su jugosidad mediante un medio ácido que debilita el tejido muscular y retiene humedad. Este medio acuoso no solo infunde sabor, sino que también actúa como un conservante natural, permitiendo que la carne se mantenga en buen estado por más tiempo (Yusop et al. 2011).

La función principal del marinado en la carne de res es triple: perfumar, sazonar y ablandar la carne antes y durante la cocción. Dependiendo de los ingredientes usados, el marinado puede ayudar a suavizar las fibras musculares, lo que resulta en una carne más tierna. Este efecto es especialmente útil en cortes de carne de res más duros, que requieren un tiempo de marinado más prolongado, generalmente de 12 a 24 horas, para lograr una mayor absorción de los sabores y mejorar la textura (Yusop et al. 2011).

2.5 Marinado por tumbleado

El marinado por tumbleado es un proceso utilizado en la industria alimentaria para mejorar la absorción de marinadas en productos cárnicos. El fundamento del marinado por tumbleado se basa en la combinación de acción mecánica y, en algunos casos y la aplicación de vacío, lo que mejora la eficiencia de absorción de líquidos en la carne. El tumbler realiza movimientos de rotación o agitación controlada, que provocan la absorción más eficiente de la marinada en la carne. La agitación rompe las fibras musculares, lo que facilita que la carne absorba una mayor cantidad de la marinada en menos tiempo, la acción mecánica ayuda a ablandar la carne, haciendo que sea más tierna después de la cocción y a rotación constante asegura una distribución uniforme de los ingredientes de la marinada en todas las piezas de carne (Toldrá 2023).

2.6 Inconvenientes del marinado por tumbleado

En estudio se determinó la dispersión de patógenos y su capacidad de supervivencia en arrachera y asado a partir de tumbleado asistido con vacío. Se evaluaron dos marinados comerciales que fueron inoculados con *Escherichia coli* O157:H7 y *Salmonella* Typhimurium con un recuento de 5.2 log UFC/mL. Las muestras se empacaron al vacío y se almacenaron al vacío a 4°C. Se tomaron muestras para los análisis el día 0, 3, 7 y 14. El

marinado al vacío facilito que los patógenos se dispersaran en la totalidad de la carne siendo detectables en todos los días en la arrachera en ambos cortes de carne, indicando así que pueden sobrevivir a temperaturas de refrigeración por un tiempo considerable. Debido a que los patógenos pueden transferirse al interior de la carne de res cuando se tumblean al vacío con un marinado contaminado y sobreviven durante el almacenamiento refrigerado, los establecimientos deben considerar los posibles riesgos de seguridad alimentaria asociados con la reutilización del marinado durante la producción de productos de carne de res centrifugados al vacío además de verificar constantemente que no se encuentre contaminada en un inicio (Muras et al. 2012).

Debido al aumento de casos de incidencia de *Salmonella* Typhimurium se realizó una investigación de aplicación de agentes antimicrobianos en filetes de carne marinados por tumbleado. Los resultados indicaron que al aplicar soluciones de ácido láctico y de vinagre en la superficie previo al marinado disminuyen la carga de patógeno superficialmente, aunque esto no tuvo ningún efecto en la translocación de la bacteria y el efecto de disminución en el interior no fue significativo. Se considera que la posible internalización de los patógenos y la capacidad de supervivencia de estos generan una preocupación importante dentro de productos marinados de res (Pokharel et al. 2016).

2.7 Ultrasonido

El ultrasonido, formalmente se refiere a ondas sonoras con una frecuencia superior a 20 kHz. La utilización de ultrasonidos en el ámbito alimentario se puede dividir en dos tipos según la potencia sonora utilizada (W) e intensidad sonora (W/m^2), o densidad de energía sonora (W/m^3). Entre ellos, las ondas ultrasónicas de alta frecuencia y baja intensidad tienen un impacto mínimo en las propiedades físicas y químicas de los alimentos. El ultrasonido se utiliza ampliamente en el procesamiento de alimentos. La base teórica para el procesamiento a menudo se atribuye a dos mecanismos clave de acción de las ondas ultrasónicas, que abarcan el efecto de cavitación y el efecto mecánico (Li et al. 2024).

El fenómeno de cavitación inducida por ondas ultrasónicas se refiere a la presencia de burbujas que contienen una pequeña cantidad de gas o vapor dentro del medio líquido. Vibran y crecen bajo la acción de ondas ultrasónicas. Cuando estas burbujas alcanzan un cierto

tamaño, se vuelven inestables y colapsan y rompen violentamente, acompañado de altas temperaturas y alta presión. La cavitación ultrasónica suele dividirse en dos tipos: cavitación en estado estacionario y cavitación instantánea. La formación y colapso de tales burbujas altera las membranas celulares de los tejidos biológicos (Li et al. 2024).

La rápida formación y posterior colapso de burbujas debido a la cavitación instantánea puede mejorar significativamente la transferencia y penetración de materiales entre el líquido de curado y los productos cárnicos. Además, la cavitación instantánea también puede destruir la estructura de la fibra muscular en los productos cárnicos, relajar la estructura de la proteína miofibrilar y disolver la proteína muscular, mejorando así la retención de agua de los productos cárnicos (Alarcón-Rojo et al. 2019).

Las ondas ultrasónicas ejercen una influencia significativa sobre la presión dentro de un material a medida que se propagan a través de él. Puede generar turbulencia y movimiento eficientes en el líquido, alterar la composición del medio, descomponer las partículas en el líquido y lograr resultados que la agitación mecánica regular de baja frecuencia no puede lograr. Al mismo tiempo, el impacto mecánico de las ondas ultrasónicas puede inducir que los tejidos conectivos duros dentro de los productos cárnicos se expandan y ablanden durante todo el proceso de curado, acelerando así la penetración de los líquidos marinados en los productos cárnicos (Li et al. 2024).

Actualmente no hay en el mercado equipos específicos para el tratamiento con ultrasonido para la carne. Los diversos estudios e investigaciones realizados se han hecho a partir de dos tipos de equipos de ultrasonido: homogenizadores/sonicadores ultrasónicos con sonda y baños de ultrasonido. De manera general y a partir del nivel de investigación actual dentro del campo no se han encontrado diferencias sustanciales a la hora de la eficacia de cualquiera de los dos equipos, aunque si hay diferencias prácticas. Los sonicadores de sonda pueden trabajar a diferentes frecuencias de ultrasonido, pero están limitados por el volumen con el que pueden trabajar, mientras que los baños de ultrasonido solamente pueden trabajar con una sola frecuencia con un volumen mucho mayor. Por el volumen de ensayos dentro del proyecto, se optó por un baño de ultrasonido (Soltani et al. 2022).

2.8 Marinado por ultrasonido

Es una técnica avanzada utilizada para acelerar y mejorar la absorción de marinadas en la carne mediante ondas sonoras de alta frecuencia. Estas ondas generan burbujas en el líquido de la marinada que, al colapsar, liberan energía. Esto provoca una mayor penetración de los ingredientes en los tejidos de la carne en un tiempo más corto que los métodos tradicionales, al colapsar, generan microcorrientes y presión en las fibras de la carne, lo que mejora la absorción de líquidos y sabores y el impacto mecánico de las ondas sonoras rompe parcialmente las fibras musculares, haciendo que la carne sea más tierna (Khalid et al. 2023).

2.9 Efectos del marinado ultrasónico en carne de res

En un estudio se evaluó el efecto del ultrasonido en la oxidación y estructura de las proteínas de *Longissimus dorsi* de res. Se trabajó con un ultrasonido de sonda a una frecuencia de 20 kHz y se utilizaron diferentes potencias (2.39, 6.23, 11.32 y 20.96 W) a 4 distintos tiempos de tratamiento (30, 60, 90 y 120 minutos). El análisis de contenido de TBARS indicó que se aumentó el grado de oxidación de lípidos, la oxidación de las proteínas también aumento debido a un aumento en los valores de contenido de carbonilo. El análisis SDS-PAGE mostró que el tratamiento con ultrasonido aumentó la agregación de proteínas a través de la reticulación disulfuro, indicada por el contenido decreciente de grupos sulfhidrilo totales que contribuirían a la oxidación de proteínas (Kang et al. 2016).

Se evaluó el efecto de ultrasonido a 20 kHz a diferentes potencias (150 y 300 W) y diferentes tiempos (30 y 120 min) en la capacidad de retención de agua y la ternura de la carne. El análisis de la pérdida por compresión y la fuerza de corte mostró que el marinado asistido por ultrasonido y papaína aumentó significativamente el valor de WHC y la ternura de la carne en comparación con la salmuera estática. Los análisis SDS-PAGE y LC-ESI-MS/MS sugirieron que el ultrasonido asistido por papaína indujo una oxidación moderada de la miosina que provocó la polimerización, lo que puede contribuir a una mayor retención de agua. TEM respaldó aún más los efectos del ultrasonido asistido por papaína sobre el WHC y los cambios de sensibilidad debido a la hinchazón y la alteración de las miofibrillas. El aumento de los valores de MFI y la proteólisis de la desmina y la troponina-T sugieren una mayor ternura de la carne de vacuno (Kang et al. 2017).

Se evaluó el efecto de marinado asistido por ultrasonido y L-histidina en milanesa pulpa de res en la calidad de la carne y las propiedades de la actomiosina. Los parámetros del tratamiento con ultrasonido se fijaron en 300 W (20 kHz, 15,6 W/cm²) durante 5 min con un pulso de 2 s encendido y 3 s apagado. El tratamiento evitó eficazmente la extracción excesiva de líquido y alteró la integridad de las miofibrillas al modificar la distribución del agua y debilitar la conexión de actina-miosina con el aumento del pH muscular, también se demostró que la muestra tratada con ultrasonido brindó más oportunidades para que la filtración de L-histidina interviniera el punto isoeléctrico y la conformación de la proteína muscular. La caspasa-3 activada y los cambios en la actividad de la ATPasa en la carne tratada con ultrasonido asistido con histidina aceleraron el envejecimiento postmortem, y la L-histidina podría inhibir competitivamente la unión actina-miosina por parte del grupo imidazol (Shi et al. 2022).

En otra investigación se evaluó el uso de un marinado de sopa de tomate asistido por ultrasonido en solomillo. Dentro del experimento se utilizó un baño de ultrasonido a 3 potencias distintas (100 W, 320 W y 640 W) a 3 tiempos diferentes (30, 60 y 90 min). Los resultados indicaron que el efecto de ultrasonido aumento considerablemente la absorción de marinado y mejoró las propiedades fisicoquímicas, la textura y los atributos de sensoriales del solomillo. Se identificó además que el tratamiento con ultrasonidos aceleró significativamente el proceso de marinado, reduciendo la fuerza de corte, la dureza y la masticabilidad de la carne, al tiempo que aumentaba su ternura. El tratamiento óptimo encontrado fue 320 W durante 60 min (Zheng et al. 2024).

2.10 Enzimas

La papaína (EC 3.4.22.2) es una enzima perteneciente a la papaya (*Carica papaya*). Se ha reportado que la enzima tiene una temperatura óptima alta (65°C) y un amplio rango de pH (5-8) para su actividad. Al romper diversos tipos de enlaces peptídicos, posee la propiedad de poder ablandar la carne, por lo que es comúnmente en ablandadores de carne y sazonzadores. La papaína es una enzima altamente eficiente que causa una degradación significativa de las proteínas miofibrilares y del colágeno (Storer 2013).

La bromelina (EC 3.4.22.32) es una enzima perteneciente a la piña (*Ananas comosus*). La escala de actividad enzimática es ligeramente menor que la de la papaína y revela una elaborada actividad proteolítica sobre péptidos sintéticos a niveles de pH de 5,0 a 7,0 y una temperatura de 50°C. La bromelina primero ataca y degrada alrededor del 40% del colágeno presente en el sarcolema, luego sigue la degradación de la miosina en la región miofibrilar (Singh et al. 2019).

2.11 Marinado enzimático y ultrasonido

En un ensayo se utilizó *Longissimus lumborum* en un ultrasonido de sonda a una frecuencia de 20 kHz a una potencia de 100 y 300 W en tres diferentes tiempos (10, 20 y 30 min) utilizando un marinado enzimático con papaína. Dentro de las pruebas realizadas, a nivel textura con un análisis de perfil y en la prueba de Fuerza de Corte de Warner-Bratzler, aumento sustancialmente el valor de ternura al momento de combinar el ultrasonido y la enzima incluso en capas profundas dentro de la muestra. A partir de un análisis de actividad enzimática se encontró que la actividad enzimática total aumenta en combinación con el ultrasonido. La combinación de parámetros ideal dentro de los ensayos fue de 100 W durante 20 minutos (Barekat y Soltanizadeh 2017).

Se estudió la aplicación combinada de papaína, ultrasonido y bicarbonato de sodio para obtener carne más blanda destinada a adultos mayores, un grupo que suele tener dificultades de masticación y deglución. El diseño experimental se optimizó mediante metodología de superficie de respuesta, probando distintas concentraciones de papaína (200–600 U/mL), tiempos de ultrasonido (20–40 min) y niveles de bicarbonato (3–5%). Los resultados mostraron que la condición óptima fue 400 U/mL de papaína, 30 minutos de ultrasonido y 4% de bicarbonato, alcanzando una dureza final de 7.16 N, frente a 22.50 N en el control (agua) y 18.62 N con solo papaína. Además, el índice de fragmentación miofibrilar fue mayor en el tratamiento combinado, lo que indica mayor desestructuración de las fibras musculares. Aunque hubo modificaciones en el color, el aspecto más interesante es que esta técnica consiguió una carne lo suficientemente tierna para ser comprimida únicamente con la lengua, mostrando una aplicación directa en nutrición geriátrica y evidenciando la sinergia positiva entre ultrasonido y enzima (Yoon et al. 2024).

Se evaluó experimentalmente el efecto del ultrasonido y la papaína, aplicados de manera individual y combinada, sobre carne de res. Se trabajó con cuatro tratamientos: control (agua), papaína (P), ultrasonido (US) y ultrasonido + papaína (USP). Los cortes fueron marinados 24 h a 4 °C y los sometidos a ultrasonido recibieron una exposición breve de 1 minuto a 20 kHz y 500 W, con pulsos intermitentes. Se midieron color, fuerza de corte Warner-Bratzler, perfil de textura, capacidad de retención de agua, pérdidas por cocción, pH y se analizaron microestructuras por microscopía electrónica de barrido. Los resultados mostraron que el tratamiento combinado logró la mayor reducción en dureza, fuerza de corte y masticabilidad, sin afectar negativamente la WHC, el pH ni las pérdidas por cocción, lo cual es un punto a favor. El análisis microestructural confirmó fibras musculares más fragmentadas y desorganizadas en USP, lo que explica la mejora en la ternura (Ahmad et al. 2024).

3. JUSTIFICACIÓN

El marinado es una técnica muy útil para darle valor agregado a la carne, aunque el método de tumbleado, el más difundido y aceptado dentro de la industria cárnica, posee varios inconvenientes. El ultrasonido es una alternativa al tumbleado que mejora el marinado sin causar daño mecánico, alterar propiedades nutricionales o afectar la textura de la carne. Además, se ha demostrado que aumenta el rendimiento de forma similar y es un método más rápido. La aplicación de ultrasonido y el tratamiento enzimático combinado han demostrado mejorar el rendimiento del marinado en cortes de res, aunque la combinación de estos dos factores ha sido poco estudiada y su aplicación en un corte graso y fibroso, como la arrechera es inexistente, por lo que es un área de oportunidad para la industria.

Dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, el proyecto tiene impacto en 2 distintos objetivos. Iniciando con el objetivo de energía y cambio climático, la tecnología del ultrasonido es más amigable con el ambiente y consume menos energía para poder generar efectos significativos dentro de la carne, disminuyendo así la notable huella de carbono que ya tiene esta industria y el otro objetivo al cual atañe el proyecto es la soberanía alimentaria, facilitado las redes de producción de alimentos de especialidad sin necesidad de agentes químicos y también mejorando la inocuidad respecto a otros métodos de marinado.

4. HIPÓTESIS

La combinación de marinado ultrasónico asistido por enzimas ablandadoras de carne exhibirá un efecto positivo superior en el rendimiento, la textura y el color de la carne en comparación al ultrasonido no asistido y tumbleado

5. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el efecto del marinado asistido por ultrasonido y enzimas ablandadoras en la arrachera de *Bos taurus* sobre el rendimiento, la textura y el color

Objetivos específicos

1. Comparar el rendimiento de 4 tratamientos de marinado (TC, TT, US, USB, USP) mediante la CRA, la absorción de marinado y la pérdida por cocción junto a la determinación del pH
2. Evaluar y comparar el efecto de 4 tratamientos de marinado (TC, TT, US, USB, USP) en el color de la carne a partir mediante un análisis colorimétrico
3. Evaluar y comparar el efecto de 4 tratamientos de marinado (TC, TT, US, USB, USP) en la textura a partir de un TPA (dureza, gomosidad, resiliencia, masticabilidad, elasticidad y cohesividad) y un análisis de fuerza de corte

Dónde:

TC = Tratamiento Control, inmersión por 30 minutos

TT = Tratamiento Tumbleado por 30 minutos

US = Tratamiento Ultrasonido

USB = Tratamiento Ultrasonido asistido con Bromelina

USP = Tratamiento Ultrasonido asistido Papaína

CRT = Tratamiento Testigo

6 METODOLOGÍA

6.1 Lugar de trabajo

El trabajo se llevó a cabo en el Departamento de Alimentos de la Facultad de Ciencias Biológicas Unidad B, ubicada en el municipio de San Nicolás de los Garza en el estado de Nuevo León.

Se trabajó específicamente en los laboratorios:

- Laboratorio de Tecnología de Alimentos
- Laboratorio de Reología

6.2 Obtención de materia prima

Debido a que el corte de arrachera representa una fracción pequeña del total de carne obtenible de una canal, no es posible poder realizar la cantidad de ensayos para todos los experimentos de un solo animal, por lo que se optó por adquirir la carne de la empacadora comercial Carne Selecta. Considerando el número de ensayos y el tamaño estimado de cada muestra, se optó por adquirir una cantidad de 40 kg de arrachera en una sola exhibición.

Para la elaboración del marinado, en el caso de las enzimas, la papaína y la bromelina se adquirieron ambos reactivos de grado alimenticio de la compañía Sigma Aldrich, para el caso del tripolifosfato de sodio y el cloruro de sodio se utilizarán los reactivos grado alimenticio adquiridos de CTR y agua potable comercial.

En el caso de equipos, se utilizaron los siguientes aparatos:

1. Texturómetro Brookfield CT3
2. Potenciómetro HI 99163 para carne
3. Colorímetro Hunter Lab ColorFlex EZ
4. Baño de ultrasonido CScientific CS-UB300
5. Texturómetro Perten TVT 6700

El esquema y orden general del trabajo se aprecia en la figura 1.

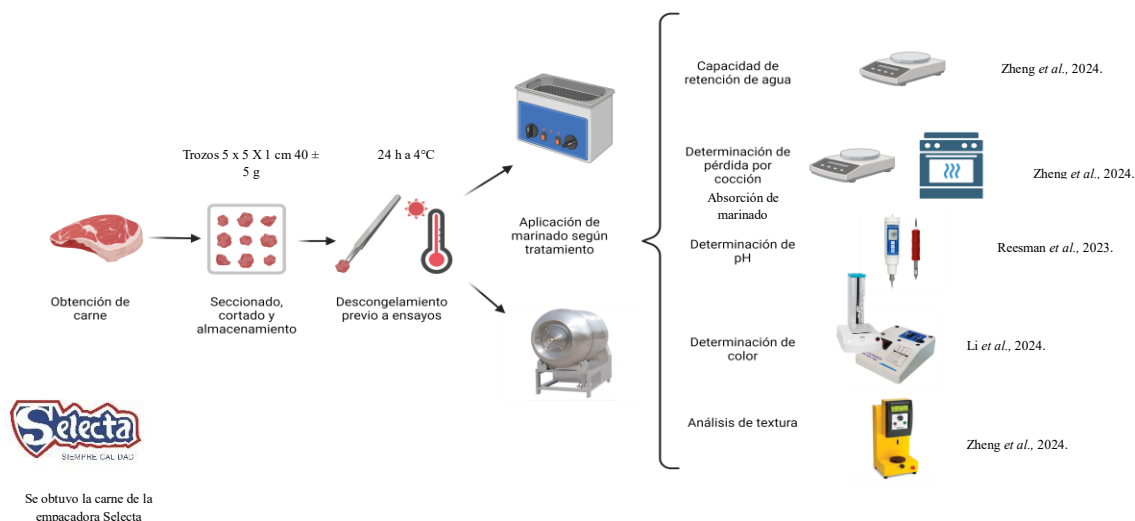


Figura 1. Diagrama general de trabajo, elaboración propia.

6.3 Proceso de marinado

Una vez preparado la cantidad correspondiente de marinado para realizar los ensayos; el cuál siguió el procedimiento de preparación de una solución, pesando la cantidad de material pertinente y agua según la proporción establecida en porcentaje de la tabla 2 para la cantidad de litros utilizada en cada ensayo; el proceso de marinado siguió una proporción de marinado de 1:2 y se trabajó con muestras de un peso de $40.0 \text{ g} \pm 5.0 \text{ g}$ de un tamaño de 5 cm de largo, 5 cm de ancho y un espesor de 1 cm, las muestras se sometieron a la congelación a -18°C para su posterior uso en ensayos.

Las muestras seccionadas previamente descongeladas a 4°C durante 24 horas fueron sometidas a la metodología descrita por Caraveo et al., en el 2014, en dónde se colocó cada una de las muestras en un empaque de plástico y la cantidad proporcional de marinado para posteriormente incorporar vacío, después el empaque al vacío fue colocado en el baño de ultrasonido (CS-UB300) a una frecuencia de 40 kHz con una potencia (300 W y 480 W) y tiempo (10, 20 o 30 min) dependiendo del tratamiento.

Las condiciones experimentales para el tumbleado fueron marinadas durante 30 minutos a 8 rpm en el equipo STX-1000-CE. Para el tratamiento de control, las muestras de carne se colocaron en un recipiente con la solución de marinado durante 30 minutos y, para los datos testigo, las muestras de carne se sometieron a prueba sin ningún tipo de marinado.

Las formulaciones que se siguieron para todos los marinados están expresadas en la tabla 2:

Tabla 2. Tratamientos experimentales

Número/Nombre de tratamiento	Cloruro de sodio	Tripolifosfato de sodio	Papaína	Bromelina	Agua	Ultrasonido	Tumbleado
USP - Ultrasonido-Papaína	2.00%	0.30%	1.0%	0.00%	96.70%	✓	
USB - Ultrasonido Bromelina	2.00%	0.30%	0.00%	1.0%	96.70%	✓	
US - Ultrasonido	2.00%	0.30%	0.00%	0.00%	97.70%	✓	
TC - Control	2.00%	0.30%	0.00%	0.00%	97.70%	X	X
CT - Caracterización	2.00%	0.30%	0.00%	0.00%	97.70%	X	X
TT - Tradicional tumbleado	2.00%	0.30%	0.00%	0.00%	97.70%		✓

6.4 Absorción de Marinado

Se usó la metodología de Zheng et al. (2024), se calculó a partir de la diferencia de peso antes y después del proceso de marinado. Las muestras se sometieron a una limpieza con una servilleta de papel antes de la pesada para eliminar el exceso de agua, una vez obtenida la medida se sometió a marinado, se volvió a limpiar el exceso de agua y se volvió a pesar. El porcentaje se determinó a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Absorción de marinado (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

Dónde: W_0 es el peso inicial antes del marinado y W_1 es el peso final después del marinado

6.5 Capacidad de Retención de Agua (CRA)

Para esta metodología se siguió el proceso descrito por Zheng et al. (2024), con algunas modificaciones. Se colocó una muestra de carne de 1,50 g entre papeles de filtro y entre placas de vidrio de 10×10 cm para después prensar durante 5 min a un peso constante de 5 kg, para posteriormente pesar. El porcentaje de CRA se determinó a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Capacidad de Retención de Agua (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

Dónde: W_i es el peso inicial antes del prensado y W_f es el peso final después del prensado

6.6 Pérdida por Cocción

Este parámetro se calculó a partir de la metodología de Caraveo et al. (2014), las muestras de carne se colocaron en una bolsa de plástico y se sellaron al vacío, luego se colocaron en un sous-vide a una temperatura constante de 85°C y se cocinaron durante 10 minutos. Después de la cocción, las muestras de carne se enfriaron a 25°C , se limpiaron con papel absorbente para eliminar el exceso de agua y se pesaron inmediatamente. El porcentaje se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida por cocción (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Dónde: W_1 es el peso inicial antes de la cocción y W_2 es el peso después de la cocción

6.7 pH

Se utilizó el método de Reesman et al. (2023) con un potenciómetro HI 99163 el cuál se usó para medir el pH de las muestras antes del tratamiento por marinado y se volvió a realizar

la medición después del marinado, posteriormente a partir de una resta se calculó la diferencia entre los parámetros.

6.8 Color

Se utilizó la metodología establecida por Li et al. (2024), con el equipo Hunter ColorFlex EZ se midieron las coordenadas L* (luminosidad), a*(eje verde-rojo) y b*(eje azul-amarillo) antes del marinado y después del mismo para poder identificar si el tratamiento genera diferencias dentro de este parámetro. La diferencia se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}$$

Dónde: L representa el valor de luminosidad, a el valor de la coordenada a y b el valor de la coordenada, los dos subíndices indican el antes y después del tratamiento

6.9 Análisis de textura

Para el análisis de textura, se siguió la metodología propuesta por Zheng et al. (2024), en un texturómetro CT3, las muestras se comprimieron dos veces utilizando una sonda cilíndrica TA11/1000 (25,4 mm de diámetro, 35 mm de largo) con los siguientes parámetros: velocidad previa a la prueba, 2 mm/s; velocidad de prueba, 2 mm/s; velocidad posterior a la prueba, 2 mm/s; distancia de compresión, 50 %; potencia de inducción, 8 g; e intervalo para la segunda presión, 2 s. El ensayo se repitió 6 veces por tratamiento, en este caso sólo se trabajaron con 5 tratamientos, el testigo (CRT), el control (CT), el tumbleado (TT), un tratamiento con ultrasonido USB-300W-30 min (US) y el tratamiento óptimo según las pruebas de rendimiento, USB-300W-10 min (USB) y se evaluaron las muestras en crudo.

6.10 Análisis de fuerza de corte

El ensayo de fuerza de corte siguió la metodología propuesta Saracila et al. (2021) con algunas modificaciones, en un texturómetro Perten TVT 6700 las muestras cocidas se sometieron a un corte utilizando una sonda triangular (671305) con soporte (675080), además

para asegurar el corte preciso los ensayos se utilizó el aditamento de una plataforma (675010). Se utilizaron los siguientes parámetros dentro del equipo: velocidad previa 3 mm/s, velocidad de prueba 3 mm/s, velocidad posterior a la prueba 3 mm/s, velocidad de retracción 10 mm/s, fuerza de activación 10 g. El ensayo se repitió 6 veces por tratamiento, en este caso sólo se sometieron 5 tratamientos, el testigo (CRT), el control (CT), el tumbleado (TT), un tratamiento con ultrasonido USB-300W-30 min (US) y el tratamiento óptimo según las pruebas de rendimiento, USB-300W-10 min (USB), las muestras se sometieron a una cocción durante 10 minutos a 85°C previo a los ensayos con un reposo a 25°C.

6.11 Análisis estadístico y diseño experimental

Los resultados se presentaron como media \pm desviación estándar para cada tratamiento. Los efectos de los tratamientos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y se aplicó la prueba de Tukey para todos los ensayos que respetaron el supuesto de la homocedasticidad, en el caso de aquellos resultados que no respetaron este supuesto, se les realizó un ANOVA de Welch con una prueba post-hoc de Games-Howell. Los tratamientos se compararon con los de testigo, control y tumbleado en las tablas individuales de tiempo, mientras que se compararon entre ellos en las gráficas compilatorias. Todas las pruebas se realizaron con 10 repeticiones, excepto la prueba de CRA, que tuvo 5 y las pruebas de análisis textura y fuerza de corte, que se realizaron 6 veces. Para todos los análisis se utilizó el software Minitab 22.

Tabla 3. Representación de las pruebas estadísticas utilizadas

RENDIMIENTO			
Ensayo	Repeticiones	Prueba estadística	Post-Hoc
Absorción de marinado	10	ANOVA WELCH	Games-Howell
Capacidad de retención de agua	5	ANOVA WELCH	Games-Howell
Pérdida por cocción	10	ANOVA WELCH	Games-Howell
pH	10	ANOVA WELCH	Games-Howell
ΔE	10	ANOVA	Tukey
TEXTURA			
Ensayo	Repeticiones	Prueba estadística	Post-Hoc
Dureza 1	6	ANOVA WELCH	Games-Howell
Adhesividad	6	ANOVA	Tukey
Fracturabilidad	6	ANOVA WELCH	Games-Howell
Dureza 2	6	ANOVA WELCH	Games-Howell
Cohesividad	6	ANOVA	Tukey
Elasticidad	6	ANOVA WELCH	Games-Howell
Gomosidad	6	ANOVA	Tukey
Masticabilidad	6	ANOVA	Tukey
Fuerza de corte	6	ANOVA WELCH	Games-Howell

7. RESULTADOS

7.1 Absorción de marinado

En la tabla 4, se aprecia que a los 10 minutos se puede observar que el tumbleo tradicional (30 minutos) y los tratamientos USB-300W y USB-480W (10 minutos) obtuvieron los mayores valores con 16.68%, 12.85% y 11.52% respectivamente, los cuáles obtuvieron una igualdad estadística ($p > 0.05$).

Tabla 4. Absorción de marinado en % a 10 minutos para los tratamientos experimentales

Tratamiento	Absorción de marinado en 10 min (%)
TC	2.63 ± 0.81 ^c
TT	16.68 ± 3.68 ^a
US-300W	4.55 ± 1.675 ^{de}
US-480W	8.03 ± 1.12 ^c
USP-300W	10.35 ± 1.99 ^{bc}
USP-480W	7.26 ± 2.75 ^{cd}
USB-300W	12.85 ± 2.08 ^{ab}
USB-480W	11.52 ± 3.10 ^{abc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games Howell: $p < 0.05$

En la tabla 5 se aprecia que, a los 20 minutos, todos los resultados demostraron una mejoría respecto al control, pero no la suficiente para igualar al tumbledado estadísticamente. La tendencia general indica que los tratamientos de USB dieron la mayor absorción con valores de 11.76% y 11.13%, seguido de los tratamientos USP y por último los tratamientos US.

Tabla 5. Absorción de marinado en % a 20 minutos para los tratamientos experimentales

Tratamiento	Absorción de marinado en 20 min (%)
TC	2.63 ± 0.81 ^e
TT	16.68 ± 3.68 ^a
US-300W	8.94 ± 3.77 ^{bcd}
US-480W	5.97 ± 1.63 ^d
USP-300W	10.41 ± 2.32 ^{bc}
USP-480W	7.62 ± 2.27 ^{cd}
USB-300W	11.76 ± 2.26 ^b
USB-480W	11.13 ± 2.86 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

En el caso de la tabla 6 se puede ver que, a los 30 minutos, los tratamientos de USB demostraron un efecto estadísticamente igual al del tumbleado con valores de 13.77%, y 12.57%. La tendencia general es que los tratamientos con 480 W demostraron valores más bajos que sus contrapartes de 300 W.

Tabla 6. Absorción de marinado en % a 30 minutos para los tratamientos experimentales

Tratamiento	Absorción de marinado en 30 min (%)
TC	2.63 ± 0.81 ^e
TT	16.68 ± 3.68 ^a
US-300W	10.90 ± 3.50 ^{bcd}
US-480W	9.17 ± 2.25 ^{cd}
USP-300W	10.69 ± 2.03 ^{bcd}
USP-480W	7.28 ± 2.31 ^d
USB-300W	13.77 ± 2.30 ^{ab}
USB-480W	12.57 ± 3.24 ^{abc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

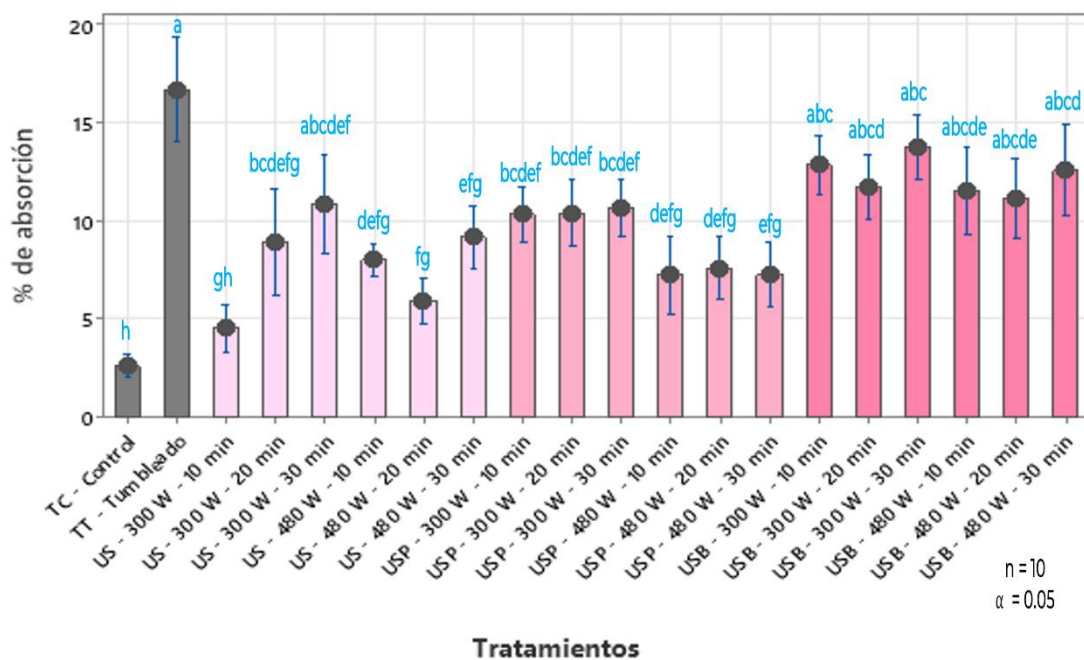


Figura 2. Absorción de marinado en arrachera a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado. Los intervalos representan desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch.

A partir de la figura 2, se infiere que a pesar de que varios tratamientos USB indicaron un efecto estadísticamente igual al tumbleado, se optó por USB-10-300W con el valor de 12.85% absorción de marinado como el mejor debido a que este lo logró con la menor potencia y tiempo de aplicación.

7.2 Capacidad de Retención de Agua (CRA)

En la tabla 7 se aprecia que, a los 10 minutos, el control y el tumbleado no presentaron diferencia significativa con valores de 48.88% y 47.78% respectivamente, indicando una CRA similar. Todos los tratamientos experimentales presentaron un incremento y diferencia significativa en la CRA, en donde USB-10-300W exhibió el valor más alto a los 10 min con 84.84%.

Tabla 7. Capacidad de retención de agua expresada como % de retención a 10 min

Tratamiento	CRA en 10 min (%)
TC	48.88 ± 2.48 ^d
TT	47.78 ± 3.04 ^d
US-300W	76.41 ± 2.18 ^{bc}
US-480W	77.76 ± 2.18 ^{abc}
USP-300W	83.21 ± 7.39 ^{ab}
USP-480W	79.63 ± 3.45 ^{ab}
USB-300W	84.84 ± 2.95 ^a
USB-480W	71.28 ± 5.25 ^c

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

En base a la información de la tabla 8, a los 20 minutos, todos los tratamientos experimentales presentaron un incremento y diferencia significativa respecto a TC y TT, los tratamientos con mayor efecto a los 20 minutos fueron los USP, con valores de 86.23% en 300W y 84.62% en 480W respectivamente.

Tabla 8. Capacidad de retención de agua expresada como % de retención a 20 min

Tratamiento	CRA en 20 min (%)
TC	48.88 ± 2.48 ^d
TT	47.78 ± 3.04 ^d
US-300W	81.63 ± 7.12 ^{abc}
US-480W	80.02 ± 2.86 ^{abc}
USP-300W	86.23 ± 1.10 ^a
USP-480W	84.62 ± 2.90 ^{ab}
USB-300W	73.81 ± 6.52 ^c
USB-480W	77.35 ± 2.64 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

Según la tabla 9, a los 30 min, la mayor CRA fue exhibida por los tratamientos USP-300W con 79.38% y USP-480W 81.61%. La tendencia general de los tratamientos fue una disminución respecto a los resultados encontrados a los 20 y 10 minutos.

Tabla 9. Capacidad de retención de agua expresada como % de retención a 30 min

Tratamiento	CRA en 30 min (%)
TC	48.88 ± 2.48 ^d
TT	47.78 ± 3.04 ^d
US-300W	66.53 ± 6.90 ^c
US-480W	77.25 ± 0.73 ^{ab}
USP-300W	79.38 ± 4.91 ^a
USP-480W	81.61 ± 3.82 ^a
USB-300W	70.82 ± 2.52 ^{bc}
USB-480W	69.50 ± 3.38 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

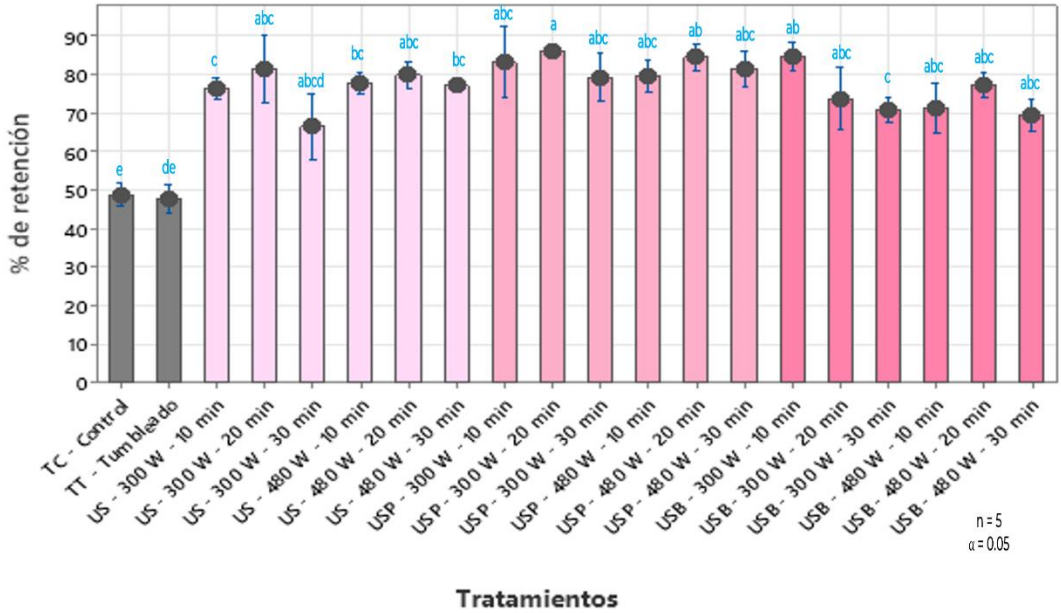


Figura 3. Gráfica de Capacidad de Retención de Agua (%) a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado. Los intervalos representan desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

En la figura 3 se aprecia que, de manera general, el control y el tumbleado no presentaron diferencia significativa. Todos los tratamientos experimentales presentaron un incremento y diferencia significativa en la CRA, en dónde USP-300W-20 exhibió el valor máximo con 86.23%, mientras que USB-300W-10 no fue significativamente distinto de este último con valores de 84.84%.

7.3 Pérdida por Cocción

En la tabla 10 se aprecia que exceptuando los tratamientos US-300W con 25.3% y US-480W con 30.01%, todos los tratamientos exhibieron una mayor pérdida por cocción, la cual fue estadísticamente equitativa en ambos tratamientos enzimáticos. El tumbleado mantuvo una pérdida similar al control y testigo. La mayor pérdida se exhibió con el tratamiento USB-300W con 40.38%.

Tabla 10. Pérdida por cocción (%) a 10 min

Tratamiento	Pérdida por cocción en 10 min (%)
CRT	20.56 ± 1.91 ^d
TC	25.10 ± 2.24 ^c
TT	23.21 ± 2.29 ^{cd}
US-300W	25.3 ± 1.79 ^c
US-480W	30.01 ± 2.25 ^b
USP-300W	39.87 ± 1.21 ^a
USP-480W	39.87 ± 1.21 ^a
USB-300W	40.38 ± 1.76 ^a
USB-480W	37.45 ± 2.39 ^a

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

Según la tabla 11, los tratamientos fueron significativamente diferentes respecto al control, testigo y tumbleado con valores más altos de pérdida por cocción. La pérdida más alta se exhibió en el tratamiento USP-300W con 41.84%.

Tabla 11. Pérdida por cocción (%) a 20 min

Tratamiento	Pérdida por cocción en 20 min (%)
CRT	20.56 ± 1.91 ^f
TC	25.10 ± 2.24 ^c
TT	23.21 ± 2.29 ^{ef}
US-300W	31.25 ± 4.14 ^{cd}
US-480W	29.31 ± 1.89 ^d
USP-300W	41.84 ± 2.05 ^a
USP-480W	36.94 ± 3.12 ^{bc}
USB-300W	38.11 ± 2.19 ^{ab}
USB-480W	36.66 ± 2.54 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

A partir de la tabla 12, se puede decir que todos los tratamientos fueron significativamente diferentes respecto al control, testigo y tumbleado, exceptuando US-300W con 28.92% que fue estadísticamente solamente al control. Todos exhibieron valores más altos de pérdida por cocción, con la mayor pérdida exhibida por USP-300W con 40.75%

Tabla 12. Pérdida por cocción (%) a 30 min

Tratamiento	Pérdida por cocción en 10 min (%)
CRT	20.56 ± 1.91 ^f
TC	25.10 ± 2.24 ^c
TT	23.21 ± 2.29 ^{ef}
US-300W	28.92 ± 2.86 ^{de}
US-480W	32.04 ± 2.48 ^d
USP-300W	40.75 ± 2.36 ^{ab}
USP-480W	37.44 ± 1.52 ^{bc}
USB-300W	38.82 ± 1.55 ^{abc}
USB-480W	37.92 ± 3.67 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

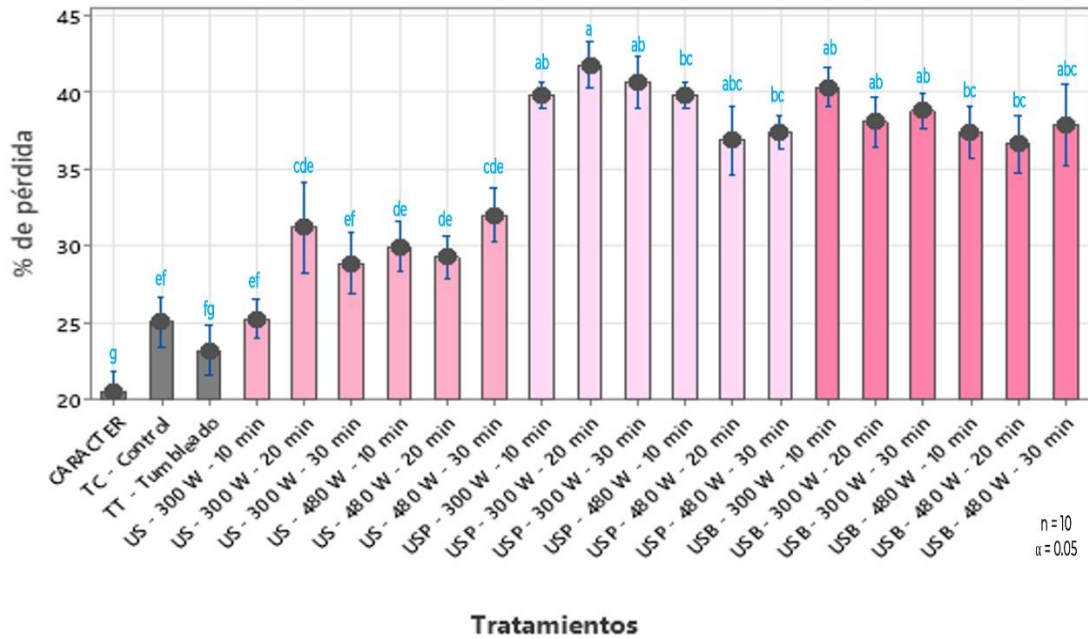


Figura 4. Pérdida por cocción (%) en arrachera a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado. Los intervalos representan desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

En la figura 4 se puede observar un aumento en las pérdidas por cocción en todos los tratamientos experimentales, no obstante, estos tratamientos resultaron en una ganancia neta en el rendimiento del producto. No obstante, el mayor grado de pérdida también se basó en el hecho de que los tratamientos afectaron a las fibras musculares, por lo tanto, estas se volvieron más propensas a perder agua

7.4 pH

Según la tabla 13, el tumbleado presentó el mayor cambio de pH con 5.72, todos los tratamientos con enzima y con ultrasonido no fueron estadísticamente distintos del control y fueron distintos del tumbleado de manera negativa.

Tabla 13. Diferencia de pH a 10 min

Tratamiento	pH a 10 min
CRT	5.38 ± 0.06 ^c
TC	5.58 ± 0.06 ^{bcd}
TT	5.72 ± 0.07 ^a
US-300W	5.52 ± 0.02 ^{sd}
US-480W	5.62 ± 0.04 ^b
USP-300W	5.50 ± 0.08 ^{cde}
USP-480W	5.52 ± 0.05 ^{sd}
USB-300W	5.50 ± 0.02 ^{de}
USB-480W	5.59 ± 0.06 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

En la tabla 14 se aprecia que todos los tratamientos fueron distintos del testigo, pero no del control de la misma manera que en la anterior, exceptuando a USB-300W con 5.66 y US-480 con 5.66, los cuales lograron una igualdad estadística respecto al tumbleado.

Tabla 14. Diferencia de pH a 20 min

Tratamiento	pH a 20 min
CRT	5.38 ± 0.06 ^d
TC	5.58 ± 0.06 ^{bc}
TT	5.72 ± 0.07 ^a
US-300W	5.61 ± 0.04 ^b
US-480W	5.66 ± 0.04 ^{ab}
USP-300W	5.51 ± 0.02 ^c
USP-480W	5.52 ± 0.04 ^c
USB-300W	5.66 ± 0.06 ^{ab}
USB-480W	5.58 ± 0.07 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

Siguiendo la misma tendencia, en la tabla 15 se observa que todos los tratamientos fueron diferentes del testigo exceptuando a USP-480W con 5.47, no fueron distintos del control y desiguales respecto al tumbleado.

Tabla 15. Diferencia de pH a 30 min

Tratamiento	30 min
CRT	5.38 ± 0.06 ^c
TC	5.58 ± 0.06 ^{bcd}
TT	5.72 ± 0.07 ^a
US-300W	5.62 ± 0.03 ^b
US-480W	5.59 ± 0.06 ^{bc}
USP-300W	5.49 ± 0.05 ^{cd}
USP-480W	5.47 ± 0.05 ^{de}
USB-300W	5.60 ± 0.08 ^{bc}
USB-480W	5.58 ± 0.09 ^{bc}

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. a, b, c, d, e: las letras indican diferencias estadísticamente significativas. Niveles de significancia de la prueba de Games-Howell: $p < 0.05$

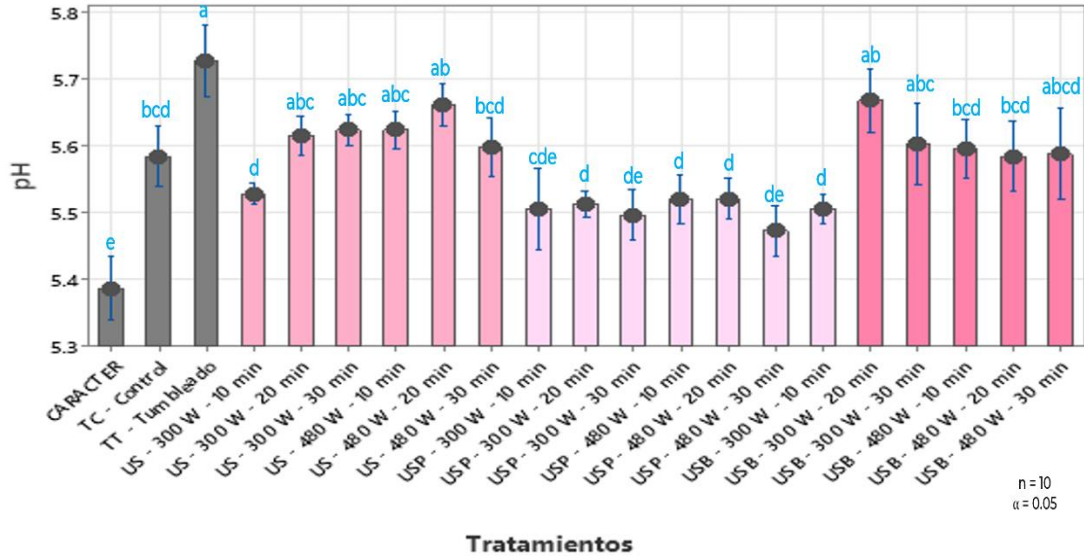


Figura 5. Gráfica de pH después de marinar a 3 tiempos a partir de diferentes tratamientos de marinado. Los intervalos representan desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

En la figura 5 se aprecia que el cambio de pH de algunos de los tratamientos no fue diferente respecto al tumbleado, siendo los ya mencionados con anterioridad y algunos más por parte de US-300W, US-480W y USB.300W. El resto no fueron diferentes al control. Aun así, se detectó una diferencia significativa respecto al testigo, lo cual indica que hay una mejora en este parámetro, aunque no tan alta y con la misma consistencia como en el tumbleado.

7.5 Determinación de la diferencia de color

En la tabla 16 se aprecia que ΔE no presentó diferencias significativas respecto al control y al tumbleado en todos los tratamientos, por lo que se puede decir que no ocurrió ningún efecto apreciable en el parámetro de color.

Tabla 16. Diferencia de color representada como ΔE para todos los tratamientos experimentales

Tratamiento	ΔE a 10 min	ΔE a 20 min	ΔE a 30 min
TC	9.33 ± 2.56^a	9.33 ± 2.56^a	9.33 ± 2.56^a
TT	10.72 ± 1.87^a	10.72 ± 1.87^a	10.72 ± 1.87^a
US-300W	10.84 ± 2.89^a	11.18 ± 3.09^a	9.54 ± 3.16^a
US-480W	9.25 ± 1.60^a	9.32 ± 2.27^a	12.51 ± 3.25^a
USP-300W	8.64 ± 2.86^a	10.21 ± 3.68^a	12.24 ± 2.91^a
USP-480W	9.66 ± 2.81^a	9.73 ± 3.05^a	11.34 ± 3.37^a
USB-300W	8.64 ± 3.24^a	13.32 ± 3.34^a	13.16 ± 3.66^a
USB-480W	10.79 ± 2.83^a	11.72 ± 3.71^a	11.64 ± 3.65^a

Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Niveles de significancia de la prueba de Tukey: $p < 0.05$

7.6 Análisis de Perfil de Textura (TPA)

En la figura 6 se aprecia el parámetro de dureza 1, correspondiente a la primera compresión, esta indicó que el tratamiento USB-300W-10 min con 6.47 N ofreció la menor dureza, indicando así mayor terneza respecto a todos los demás tratamientos, seguido del ultrasonido con 9.95 N y el tumbleado con 16.73 N

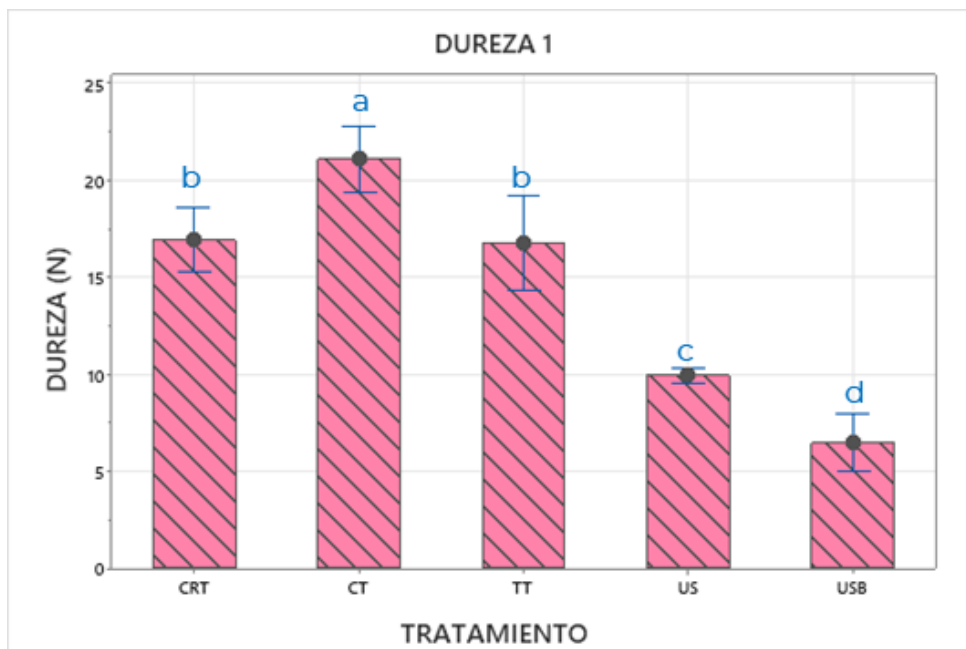


Figura 6. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Dureza 1. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

En la figura 7 se observa que CRT fue el valor más bajo de adhesividad con 0.25 mJ y el único en igualarlo estadísticamente fue el tumbleado con 0.5 mJ. Para el resto de los valores, USB obtuvo 0.65 mJ, US obtuvo 0.6 mJ y CT 0.76, los cuales fueron estadísticamente iguales. La tendencia general indica valores bastante bajos, lo cual corresponde a lo esperado para muestras de carne.

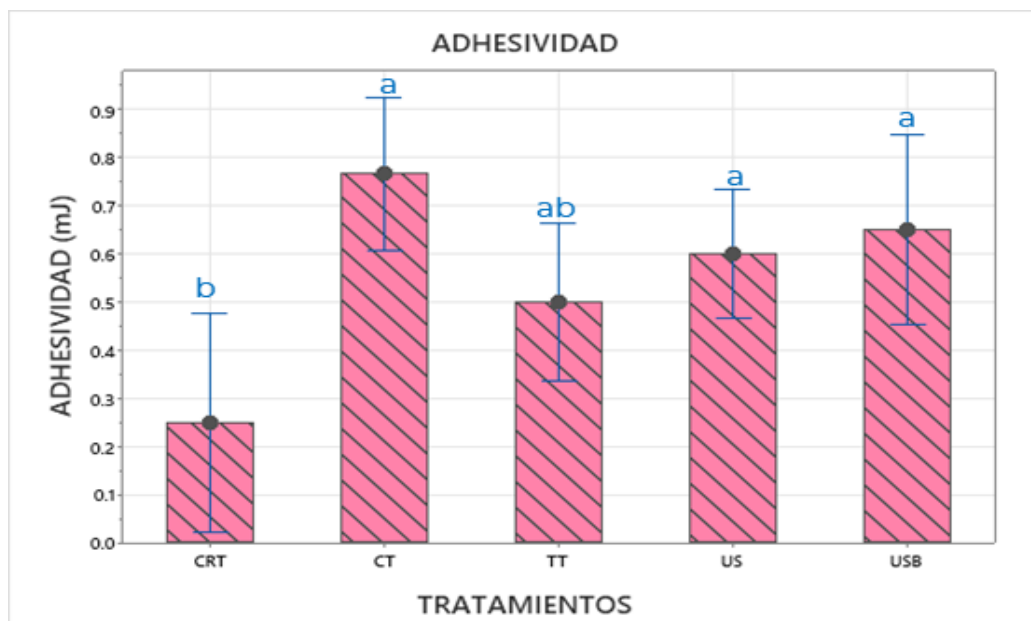


Figura 7. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Adhesividad. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey: $p < 0,05$

En el caso de la figura 8, el equipo indicó que la fracturabilidad = Dureza 1, siguiendo la misma tendencia, USB exhibió la menor dureza, indicando así mayor terneza respecto a todos los demás tratamientos, seguido del ultrasonido y por último el tumbleado.

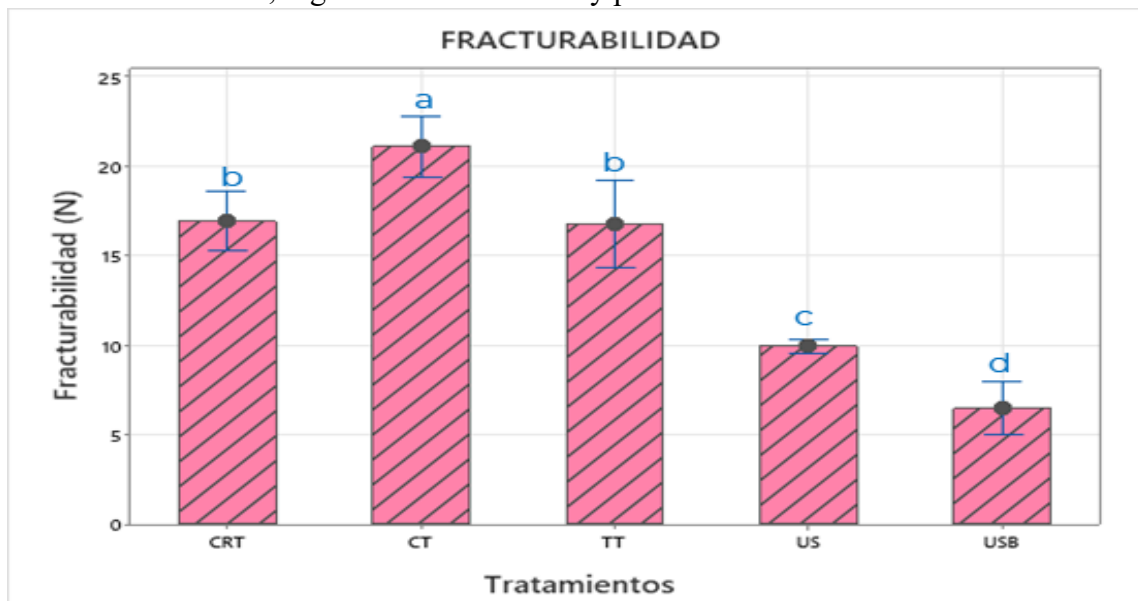


Figura 8. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Fracturabilidad. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

En la figura 9 se aprecia el parámetro de Dureza 2, correspondiente a la segunda compresión del TPA. Todos los tratamientos exhibieron una menor dureza respecto a Dureza 1, en este caso US con un valor de 6.82 N y USB con 5.02 n no demostraron diferencia significativa en su valor de dureza, seguido de TT con 10.80 N y CRT con 12.28 N.

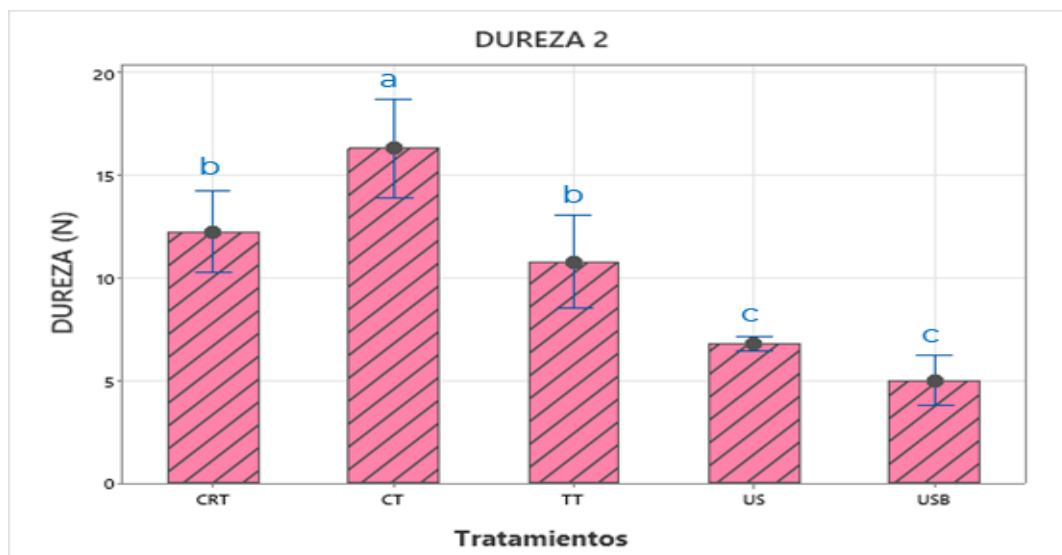


Figura 9. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Dureza 2. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

En referencia a la figura 10, correspondiente a la cohesividad, USB fue el único significativamente diferente con un valor de 0.49, mientras que los demás fueron iguales con valores entre los 0.37 y 0.41, destacando así un ligero aumento firmeza por parte de USB.

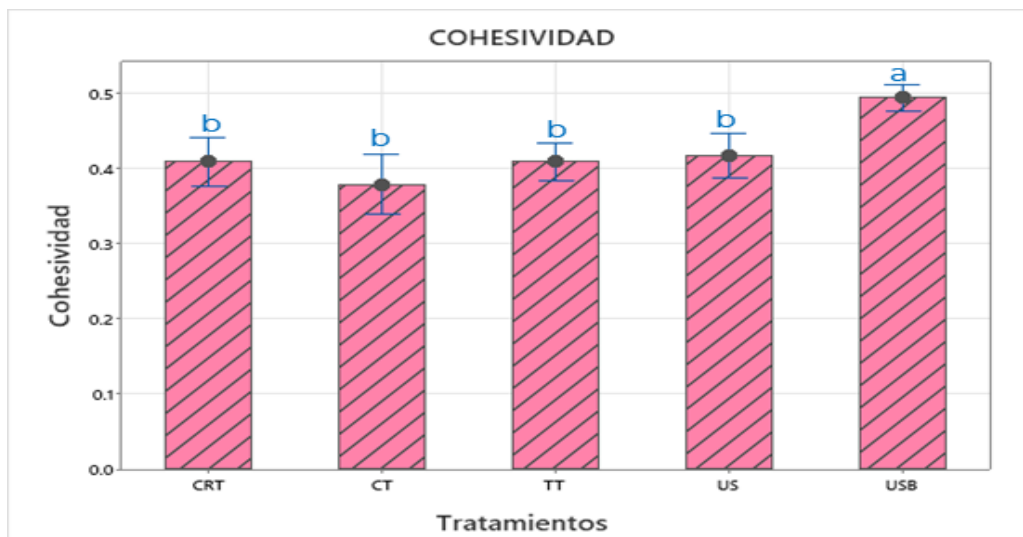


Figura 10. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Cohesividad. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey: $p < 0.05$

Respecto a la figura 11 y la elasticidad, USB demostró la mayor elasticidad con 4.235 mm, indicando mayor jugosidad y capacidad de recuperar su forma original, seguido de CT con 3.36 mm junto a US con un valor de 3.36 mm también y por último TT exhibiendo 2.77 junto a CRT con 2.7 mm.

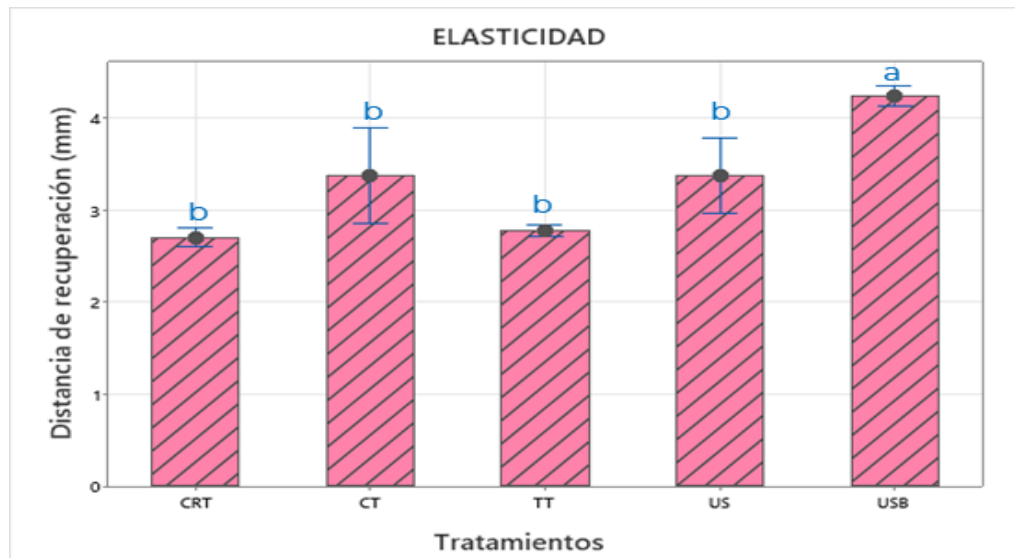


Figura 11. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Elasticidad. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey: $p < 0.05$

En la figura 12 se aprecia la Gomosidad, US con 4.15 N y USB 3.18 N fueron iguales estadísticamente, indicando una textura más blanda mientras que los demás tratamientos fueron diferentes y, por lo tanto, más densos con valores superiores a los 6 N.

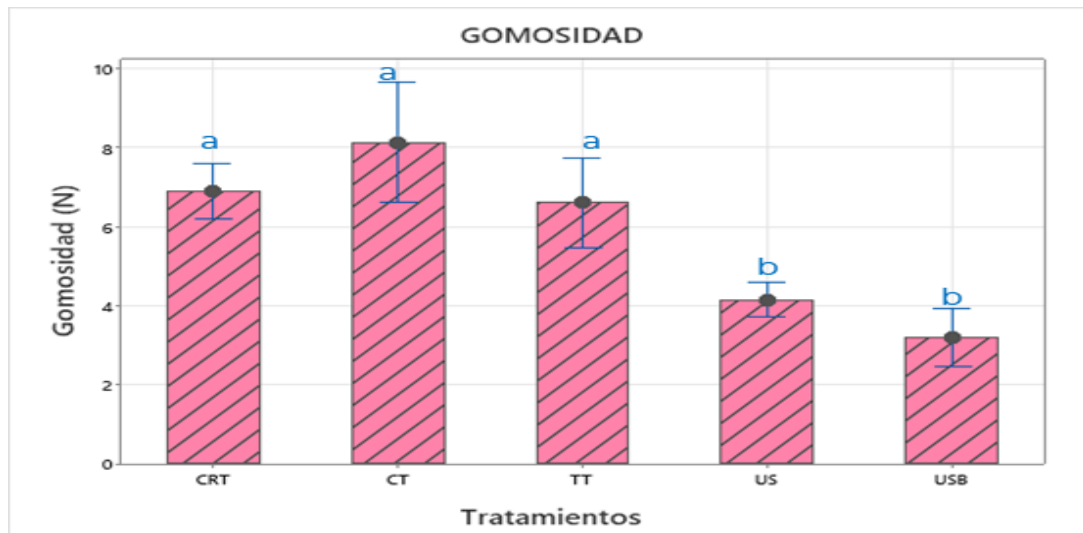


Figura 12. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Gomosidad. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey: $p < 0.05$

Para la masticabilidad, la cual se aprecia en la figura 13, la masticabilidad, solamente CT con 26.19 mJ presentó un valor relativamente alto y diferencia estadística, todos los demás presentaron valores relativamente bajos siendo USB el más bajo con 13.47 mJ junto a US con 14.10 mJ, estos valores indican que la energía requerida al momento de masticar y deglutir es menor y, por lo tanto, poseen mayor terneza y facilidad para comer.

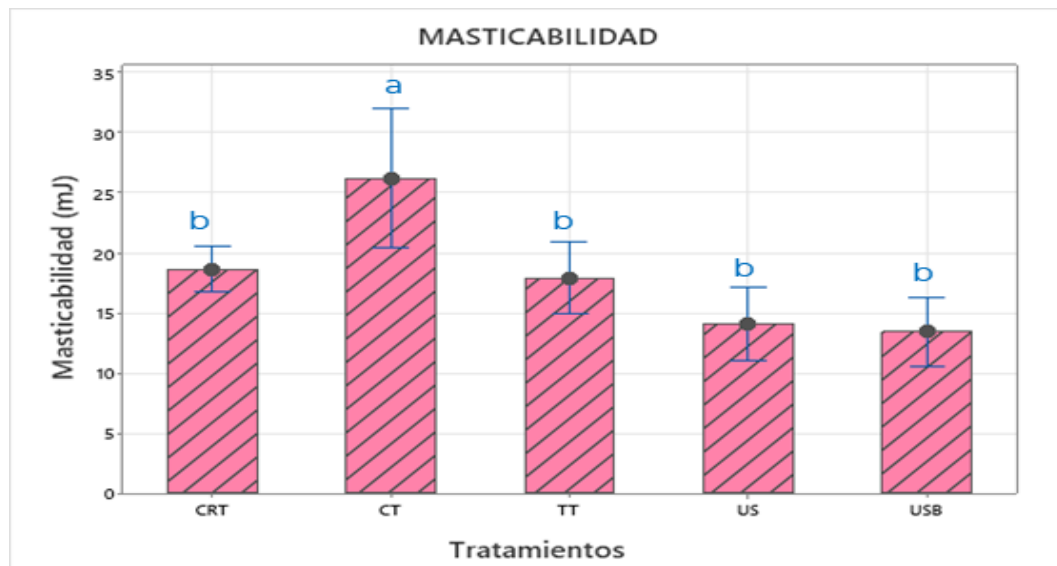


Figura 13. Gráfica del TPA correspondiente al parámetro de Masticabilidad. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

7.7 Análisis de Fuerza de Corte (SF)

USB con un valor de 4.67 N demostró el menor valor de SF, seguido de US con 6.60 N y TT con 7.01 N que fueron estadísticamente iguales, indicando así una textura suave y la menor resistencia al momento de la primera incisión generada al morder.

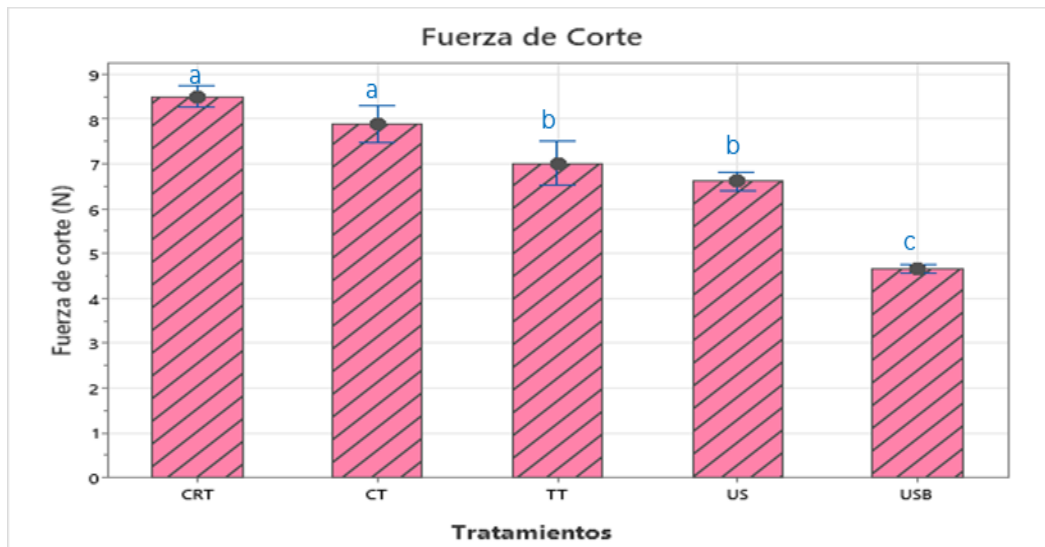


Figura 14. Gráfica del análisis de Fuerza de Corte. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Games-Howell posterior a ANOVA de Welch

8. DISCUSIÓN

Los hallazgos respaldaron la hipótesis de que la integración del ultrasonido y el tratamiento enzimático puede mejorar el rendimiento de la carne y la retención de agua de forma más eficaz que el ultrasonido o el tumbleado por sí solos. Cabe destacar que el tratamiento USB-300 W-10 min, que combinó bromelina con ultrasonido, logró niveles de absorción del marinado estadísticamente equivalentes a los obtenidos mediante el tumbleado convencional en tan solo un tercio del tiempo. Este resultado indica una clara ventaja en la eficiencia del proceso con posibles beneficios para las operaciones a escala industrial.

Los resultados de la absorción del marinado son particularmente significativos porque reflejan el mecanismo principal por el cual los componentes solubles en agua, incluyendo sales y fosfatos, penetran en la matriz de la carne. Los tratamientos con bromelina y ultrasonido de menor potencia superaron al control y se acercaron o igualaron el valor de referencia del tumbleado. Esto sugiere que los fenómenos de cavitación inducidos por ultrasonido no solo facilitan la difusión del marinado, sino que también mejoran la permeabilidad tisular cuando se utilizan junto con enzimas. Esto concuerda con informes previos de Zheng et al. (2024) y Shi et al. (2022), quienes observaron una mejor absorción de salmuera en la carne de res y el músculo semitendinoso al utilizar marinado asistido por ultrasonido. La mayor absorción del marinado en menos tiempo que con el tumbleado en tratamientos enzimáticos, especialmente con bromelina, puede atribuirse a la proteólisis enzimática, que abre vías estructurales, lo que hace que las fibras musculares sean más receptivas a la migración de solutos.

La mejora en la CRA en todos los tratamientos basados en ultrasonido es consistente con hallazgos previos que muestran que el ultrasonido altera las fibras musculares y facilita la retención de agua mediante el desdoblamiento de proteínas y el aumento del espacio intersticial según lo establecido por Charoux et al. (2017) y Kang et al. (2016). Esta mejora en la CRA contrasta directamente con los hallazgos de Barekat y Soltanizadeh del 2017, quienes no informaron una mejora significativa al combinar papaína con ultrasonido. Estas discrepancias podrían atribuirse a diferencias en la composición muscular, el contenido de grasa o los parámetros del tratamiento, lo que subraya la importancia de adaptar las tecnologías a cortes de carne específicos. En este estudio, el uso de arrachera (un corte graso

con características estructurales diferentes a las de los cortes magros) podría haber contribuido a los resultados favorables observados.

Se observó un aumento en las pérdidas por cocción en todos los tratamientos experimentales, lo cual es previsible dado el mayor impacto a las fibras musculares a nivel textura. No obstante, estos tratamientos resultaron en una ganancia neta en el rendimiento del producto, en consonancia con los informes de Shi et al. (2022) y Kang et al. (2017), que enfatizan el equilibrio entre la retención de agua antes de la cocción y las pérdidas durante el procesamiento térmico. Esta compensación sugiere que, si bien las pérdidas por cocción aumentan, el beneficio económico para los procesadores en términos de rendimiento crudo sigue siendo positivo.

Cabe destacar que las mediciones instrumentales de color no revelaron diferencias significativas entre los tratamientos, incluidos los que involucran enzimas. Este hallazgo es particularmente relevante dado que los cambios de color se citan a menudo como un parámetro muy importante en los marinados basados en enzimas según lo indicado por Yoon et al. (2024). Los resultados sugieren que las condiciones utilizadas, en particular la ausencia de bicarbonato de sodio, que mostró un cambio significativo de color en los ensayos realizados por Yoon et al. (2024), y las concentraciones moderadas de enzimas, son adecuadas para preservar la calidad visual de la carne, esencial para su aceptación por parte del consumidor.

El pH de la carne marinada aumentó ligeramente entre los tratamientos, como se esperaba debido a la composición del marinado al contener tripolifosfato de sodio. Todos los tratamientos ejercieron un aumento de pH superior respecto al control, pero no tan alto como el tumbleado, aun así, este cambio indica una mayor actividad proteolítica favoreciendo la absorción de marinado. Estos resultados coinciden con informes previos como los establecidos por Reesman et al. (2023) y Yoon et al. (2024), los cuales sugieren que el ultrasonido puede facilitar una difusión más profunda del marinado.

Referente a la textura, Yoon et al. (2024) reportaron que la papaína asistida con US puede reducir la dureza en un 46.31%, lo cual corrobora los resultados encontrados dentro de este ensayo, además en ese estudio se utilizó un tratamiento USP+Bicarbonato de sodio, que

demonstró una reducción del 68.19%, esto es más similar a la reducción encontrada utilizando solamente la bromelina, indicando así un mayor efecto ablandador.

Para la fuerza de corte, Ahmad et al. (2024) obtuvieron un valor de SF máxima de 6.43 ± 3.35 en un tratamiento de USP, resultado el cuál es similar a lo obtenido en este ensayo solamente con US de 6.60 ± 0.39 , mientras que USB exhibió una disminución aún mayor de 4.67 ± 0.9 , demostrando que la bromelina mejora la terneza de manera más efectiva.

9. CONCLUSIONES

Si bien se han realizado numerosos experimentos con marinado ultrasónico en cortes magros de carne, como el ribeye y el solomillo, no se ha realizado ninguno en un corte graso como la arrachera. Los resultados mostraron que el ultrasonido por sí solo, que ha sido eficaz en cortes magros, no es suficiente para diferenciar entre el marinado por tumbleado de la arrachera y la aplicación del marinado con ultrasonido.

El ultrasonido por sí solo y el marinado asistido por ultrasonido mostraron un aumento significativo en el parámetro CRA, lo cual es importante considerar, ya que en la mayoría de los casos se registró un incremento superior al 20 % y, aunque también aumenta la pérdida por cocción, el rendimiento para el productor aumenta la rentabilidad económica.

El tratamiento USB-300W-10, logró niveles de absorción de marinado estadísticamente equivalentes a los obtenidos mediante el tumbler en tan solo un tercio del tiempo con una mejora sustancial en la CRA. Este resultado indica una clara ventaja en la eficiencia del proceso con posibles beneficios para las operaciones a escala industrial. A nivel textura, el TPA indicó los valores más bajos de dureza 1 y 2 para USB-300W-10, mientras que el ensayo de SF exhibió también el valor más bajo, indicando la mayor ternura en el ultrasonido asistido.

Los hallazgos validan la hipótesis de que la integración del ultrasonido y el tratamiento enzimático puede mejorar el rendimiento de la arrachera y la textura de forma más eficaz que el ultrasonido o el tumbleado por sí solos sin una variación significativa en el color en arrachera.

10. PERSPECTIVAS

A pesar de estos resultados positivos, se deben reconocer varias limitaciones. El estudio se limitó a un solo corte de carne de res (arrachera), algo que no se había reportado previamente. Finalmente, la ausencia de ensayos de almacenamiento a largo plazo impide extraer conclusiones sobre la vida útil o la estabilidad microbiana, aspectos cruciales para la aplicación industrial.

Estudios futuros deberían investigar la aplicabilidad del marinado ultrasónico asistido por enzimas a otros tipos y cortes de carne, fuentes de proteína alternativas. Ampliar el trabajo para incluir paneles sensoriales, estudios de aceptación del consumidor y perfil microbiano ofrecería una evaluación más integral de la viabilidad comercial de este método. Además, estudios que integren la vida útil y las condiciones de envasado podrían aportar más información a las estrategias de implementación industrial.

11. BIBLIOGRAFÍA

Ahmad Danial, A. N., Ismail, N. A., Nor-Khaizura, M. A. R., Azman, E. M., Noranizan, M.A., Ismail-Fitry, M. R. (2024). The combined effect of ultrasound treatment and papain on the quality properties of beef. *Food Research*, 8(7): 8–15.

Agriculture and Horticulture Development Board. (2019). Beef Muscle Guide. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/ahdb1/docs/beef-muscle-guide#google_vignette

Alarcón-Rojo, AD, Carrillo-López, LM, Reyes-Villagrana, R., Huerta-Jiménez, M. y García-Galicia, I. (2019). Ultrasonido y calidad de la carne: una revisión. *Ultrason. Sonochem.* 55, 369–382.

Alvarado-Lagunas, E., Morales-Ramírez, D., Contreras-Tovías, C. O. (2016). La percepción de los jóvenes sobre la producción, consumo y bienestar animal en Monterrey, Nuevo León. *Matemáticas Aplicadas a la Economía, Handbook TI*, 19-31.

Álvarez-Romero, J., Medellín R., A. (2005). *Bos taurus*. Vertebrados superiores exóticos en México: diversidad, distribución y efectos potenciales. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto U020. [En línea]. Disponible en: <http://conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfU020.pdf>

Barekat, S., Soltanizadeh, N. (2017). Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment. *Innovative. Food Science & Emerging Technologies*, 39: 223–229.

Caraveo, O., Alarcon-Rojo, A. D., Renteria, A., Santellano, E., Paniwnyk, L. (2014). Physicochemical and microbiological characteristics of beef treated with high-intensity ultrasound and stored at 4 °C. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(12): 2487–2493.

Charoux, C. M. G., O'Donnell, C. P., & Tiwari, B. K. (2017). Ultrasound Processing and Food Quality. In *Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation*. Elsevier, pp. 215–235.

Consejo Mexicano de la Carne. (2023). El MERCADO DE LA CARNE EN MÉXICO. [En línea]. Disponible en: https://comecarne.org/wp-content/uploads/2021/10/El_mercado_de_la_carne_en_M%C3%A9xico.pdf

Ha, M., Warner, R. D., Sikes, A., Vaskoska, R. (2022). Cooking and novel postmortem treatments to improve meat texture and tenderness. *New Aspects of Meat Quality*. Woodhead Publishing, pp. 473–506.

Instituto Nacional de Aprendizaje (Costa Rica). Guía descriptiva de cortes de carne de res y cerdo en Costa Rica. INA. [En línea]. Disponible en: <https://www.ina.ac.cr/AcercaINA/Documentos%20compartidos/Documentos%20Didacticos/Guia%20cortes%20carne.pdf>

Instituto Nacional de Carnes. (2023). Manual de cortes bovinos para abasto. [En línea]. Disponible en: https://www.inac.uy/innovaportal/file/6726/1/manual_abasto_low.pdf

Kang, D., Gao, X., Ge, Q., Zhou, G., Zhang, W. (2017). Effects of ultrasound on the beef structure and water distribution during curing through protein degradation and modification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38: 317–325

Kang, D., Zou, Y., Cheng, Y., Xing, L., Zhou, G., Zhang, W. (2016). Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 33: 47–53.

Khalid, W., Arshad, M. S., Maqbool, Z., Jayasinghe, G. D. T. M., Jinadasa, B. K. K. K., Fowler, S. W., Kousar, S., Javed Ansari, M. (2023). Synergistic effect of ultrasound and microwave treatments in meat, fish, and seafood processing, preservation, and extraction. In *Ultrasound and Microwave for Food Processing*. Academic Press, pp. 139–156.

Li, X., Wang, H., Guo, C., Wang, L. (2024). Profiling of microbial populations present in ground beef and plant-based meat analogues. *LWT*, 196: 115845.

Muras, T. M., Harris, K. B., Lucia, L. M., Hardin, M. D., Savell, J. W. (2012). Dispersion and Survival of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* Typhimurium during the Production of Marinated Beef Inside Skirt Steaks and Tri-Tip Roasts. *Journal of Food Protection*, 75 (2): 255–260.

- Narchi, N. E., Búrquez, A., Trainer, S., Rentería-Valencia, R. F. (2015). Social Constructs, Identity, and the Ecological Consequences of Carne Asada. *Journal of the Southwest*, 57(2-3): 305–336.
- Pokharel, S., Brooks, J. C., Martin, J. N., Brashears, M. M. (2016). Antimicrobial susceptibility and internalization of *Salmonella* Typhimurium in vacuum-tumbled marinated beef products. *Letters in Applied Microbiology*, 63 (6): 412–418.
- Reesman, C., Sullivan, G., Danao, M.-G., Mafi, G. G., Pfeiffer, M., & Ramanathan, R. (2023). Effects of high-pressure processing on cooked color and eating qualities of dark-cutting beef. *Applied Food Research*, 3 (1): 100260.
- Rodríguez, Arturo. (2009). Restaurante “Arracheras Alda”. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. [Tesis de maestría].
- Saracila, M., Panaite, T. D., Mironeasa, S., Untea, A. E. (2021). Dietary Supplementation of Some Antioxidants as Attenuators of Heat Stress on Chicken Meat Characteristics. *Agriculture*, 11(7): 638.
- Shi, H., Ali Khan, I., Zhang, R., Zou, Y., Xu, W., Wang, D. (2022). Evaluation of ultrasound-assisted L-histidine marination on beef *M. semitendinosus*: Insight into meat quality and actomyosin properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 85: 105987.
- Soltani Firouz, M., Sardari, H., Alikhani Chamgordani, P., Behjati, M. (2022). Power ultrasound in the meat industry (freezing, cooking and fermentation): Mechanisms, advances and challenges. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86: 106027.
- Toldrá, F. (2023). The storage and preservation of meat. III—Meat processing. Lawrie’s Meat Science. Woodhead Publishing, pp. 281–314.
- USDA. (2024). Taxon: *Bos taurus*. [En línea]. Disponible en: <https://acir.aphis.usda.gov/s/cird-taxon/a0ut0000000r9eeAAA/bos-taurus>
- Yoon, D. Y., Lee, K. Y., Lee, H. G. (2024). Effect of ultrasound-assisted treatment on meat tenderization for elderly individuals. *Food Science and Biotechnology*, 33(11): 3029–3036.

Yusop, S. M., O'Sullivan, M. G., Kerry, J. P. (2011). Marinating and enhancement of the nutritional content of processed meat products. *Processed Meats*. Woodhead Publishing, pp. 421–449.

Zheng, H., Li, L., Huang, C., Liu, S., Chen, X., Wang, X., & Hu, P. (2024). Evaluation of ultrasound-assisted tomato sour soup marination on beef: Insights into physicochemical, sensory, microstructural, and flavour characteristics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 110: 107028.