



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

FoodUPV
INSTITUTO DE INGENIERIA DE ALIMENTOS

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería
de Alimentos (FoodUPV)

Predicción del contenido de grasa intramuscular en lomo
vacuno mediante ultrasonidos sin contacto

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Gestión de la Seguridad y Calidad
Alimentaria

AUTOR/A: Pinero Picca, Anna Constanza

Tutor/a: García Pérez, José Vicente

Cotutor/a: Benedito Fort, José Javier

Cotutor/a externo: Giacomozzi, Anabella Soledad

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

PREDICCIÓN DEL CONTENIDO DE GRASA INTRAMUSCULAR EN LOMO VACUNO MEDIANTE ULTRASONIDOS SIN CONTACTO

Anna Constanza Pinero Picca, Anabella Soledad Giacomozzi, José Vicente García Pérez, José Javier Benedito Fort

RESUMEN

El contenido de grasa intramuscular es de gran importancia en los productos cárnicos debido a su influencia en atributos de calidad sensorial, como la textura y el sabor. Su determinación se realiza mediante ensayos instrumentales que, generalmente, resultan ser lentos e implican la destrucción de la muestra. Es por ello que la industria cárnica se encuentra en la búsqueda de tecnologías alternativas que permitan monitorizar de manera no-destructiva y no-invasiva parámetros de calidad en la línea de proceso. En base a ello, el objetivo del presente trabajo consistió en evaluar la viabilidad de la técnica de ultrasonidos sin contacto para predecir el contenido de grasa intramuscular en filetes de lomo de vacuno. Para ello, se emplearon muestras con tres niveles distintos de grasa intramuscular (IMF), a las cuales se les realizaron las mediciones de contenido de grasa, parámetros ultrasónicos y texturales en condiciones de refrigeración (4°C). Los resultados experimentales mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las velocidades ultrasónicas de las muestras con distinto contenido de IMF, aumentando 81.64 m/s por cada 1% b.h. de IMF. Además, se observó una disminución en la atenuación de la señal a medida que aumenta el contenido de IMF, lo que favoreció el nivel de energía de la señal reflejado en el incremento de su amplitud e integral. Con respecto a los parámetros texturales, se obtuvo un incremento de la dureza con el aumento del contenido de IMF, el cual podría atribuirse a la cristalización de la grasa a bajas temperaturas. Adicionalmente, se observó una correlación adecuada entre los parámetros ultrasónicos (velocidad, amplitud e integral) con la dureza de las muestras. En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que la técnica de ultrasonidos sin contacto es viable para predecir el contenido de grasa intramuscular en filetes de lomo vacuno, garantizando el control de calidad del producto, sin comprometer la seguridad alimentaria durante su caracterización.

PALABRAS CLAVE: ultrasonidos sin contacto, análisis no invasivo y no destructivo, monitorización, calidad alimentaria, transformación digital.

RESUM

El contingut de greix intramuscular és de gran importància en els productes carnis a causa de la seua influència en atributs de qualitat sensorial, com la textura i el sabor. La seua determinació es realitza mitjançant assajos instrumentals que, generalment, resulten ser lents i impliquen la destrucció de la mostra. És per això que la indústria càrnia es troba en la busca de tecnologies alternatives que permeten monitorar de manera no-destructiva i no-invasiva paràmetres de qualitat en la línia de procés. Sobre la base d'això, l'objectiu del present treball va consistir a avaluar la viabilitat de la tècnica d'ultrasons sense contacte per a predir el contingut de greix intramuscular en filets de llom de boví. Per a això, es van emprar mostres amb tres nivells distints de greix intramuscular (IMF), a les quals se'ls van realitzar els mesuraments de contingut de greix, paràmetres ultrasònics i *texturals en condicions de refrigeració (4 °C). Els resultats experimentals van mostrar diferències significatives ($p < 0.05$) entre les velocitats ultrasòniques de les mostres amb distint contingut de IMF, augmentant 81.64 m/s per cada 1% b.h. de IMF aproximadament. A més, es va observar una disminució en l'atenuació del senyal, a mesura que augmenta el contingut de IMF, la qual cosa va afavorir el nivell d'energia del senyal reflectit en l'increment de la seua amplitud. Respecte als paràmetres texturals, es va obtenir un increment de la duresa amb l'augment del contingut de IMF, el qual podria atribuir-se a la cristal·lització del greix a baixes temperatures. Addicionalment, es va observar una correlació adequada entre els paràmetres ultrasònics (velocitat, amplitud i integral) amb la duresa de les mostres. Sobre la base dels resultats obtinguts, es pot concloure que la tècnica d'ultrasons sense contacte és viable per a predir el contingut de greix intramuscular en filets de llom boví, garantint el control de qualitat del producte, sense comprometre la seguretat alimentària durant la seua caracterització.

PARAULES CLAU: ultrasons sense contacte, anàlisi no invasiva i no destructiu, monitoratge, qualitat alimentària, transformació digital.

SUMMARY

Intramuscular fat content is of great importance in meat products due to its influence on sensory quality attributes such as texture and flavor. Its determination is carried out by means of instrumental tests, which are generally slow and involve the destruction of the sample. This is why the meat industry is looking for alternative technologies that allow non-destructive and non-invasive monitoring of quality parameters in the process line. Based on this, the aim of the present work was to evaluate the viability of the non-contact ultrasound technique to predict the intramuscular fat content in beef tenderloin steaks. For this purpose,

samples with three different levels of intramuscular fat (IMF) were used, to which fat content, ultrasonic and textural parameters were measured under refrigerated conditions (4°C). The experimental results showed significant differences ($p < 0.05$) between the ultrasonic velocities of the samples with different IMF content, increasing 81.64 m/s for each 1% b.h. of IMF approximately. In addition, a decrease in signal attenuation was observed as the MFI content increases, which favored the energy level of the signal reflected in the increase of its amplitude. Regarding the textural parameters, an increase in hardness was obtained with increasing MFI content, which could be attributed to fat crystallization at low temperatures. Additionally, a good correlation between the ultrasonic parameters (velocity, amplitude and integral) and the hardness of the samples was observed. Based on the results obtained, it can be concluded that the non-contact ultrasound technique is feasible to predict the intramuscular fat content in beef tenderloin steaks, guaranteeing product quality control without compromising food safety during characterization.

KEY WORDS: non-contact ultrasound, non-invasive and non-destructive analysis, monitoring, food quality, digital transformation.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de la carne es un aspecto fundamental en la industria cárnica ya que no solo influye en la satisfacción del consumidor, sino que también asegura el cumplimiento de la seguridad a lo largo de la cadena alimentaria. En particular, la calidad sensorial está altamente influenciada por la cantidad y distribución de la grasa en la carne (Fariñas et al., 2021). Aunque las técnicas convencionales de control de calidad permiten evaluar la frescura, ternura, sabor y contenido de grasa, éstas suelen tener limitaciones significativas: pueden alterar la composición de la carne, requerir la destrucción de la muestra (Jimenez et al., 2023), ser demasiado lentas y poco adecuadas para su implementación en líneas de procesamiento a nivel industrial (Fariñas et al., 2021). Ante estos desafíos, la industria cárnica se encuentra en la búsqueda de alternativas innovadoras alineadas con los principios de la industria 4.0, que permitan monitorizar los parámetros de calidad de manera rápida, fiable y continua, sin comprometer la seguridad alimentaria. Entre estas tecnologías emergentes destaca el uso de ultrasonidos, un tipo de onda mecánica con una frecuencia superior a 20 kHz (Leighton, 2007). Esta técnica es especialmente sensible a las propiedades mecánicas del medio en el que se propaga, lo que permite analizar cambios en la onda ultrasónica para obtener información sobre la composición del material estudiado (Sánchez - Jimenez et al., 2023). Los cambios en la propagación de las ondas ultrasónicas, como variaciones en su velocidad y atenuación proporcionan datos valiosos relacionados con las propiedades mecánicas del material, así como con procesos físicos y químicos o incluso sobre su estructura (Ensminger

y Bond, 2012). Por esta razón, los ultrasonidos han sido aplicados en distintos tipos de alimentos, en el sector cárnico en concreto, se han empleado ultrasonidos por contacto para estudiar la composición de productos cárnicos curados en seco (Corona et al., 2014), evaluar las propiedades texturales en jamón ibérico (Corona et al., 2023), o bien estudiar la caracterización acústica de lomos de vacuno mediante transductores ultrasónicos por contacto (Jimenez et al., 2023). Además, se ha demostrado su viabilidad combinando ultrasonidos con otras tecnologías, como en el caso de De Prados et al. (2015) quienes estimaron el contenido de grasa en jamones de cerdo mediante ultrasonidos por contacto y rayos X. No obstante, una de las principales limitaciones de esta técnica es la necesidad de contacto directo entre el transductor y la muestra, lo que puede generar problemas de seguridad alimentaria y ralentizar las medidas industriales (Sánchez - Jimenez et al., 2023). Lo anterior no sólo representa un problema de seguridad alimentaria, por el riesgo de contaminación cruzada, sino que también existe la posibilidad de alterar la superficie del material analizado y ralentizar el proceso continuo de selección al momento de clasificar y segregar los alimentos según sus características.

En este contexto, surge el uso de ultrasonidos acoplados por aire (sin contacto), una tecnología que permite superar estas limitaciones mediante el desarrollo de sensores capaces de operar eficientemente sin necesidad de contacto directo. En este caso, la onda ultrasónica viaja a través del aire, atraviesa el material de estudio y regresa al receptor, lo que permite una medición rápida, no destructiva y adecuada para evaluaciones in situ en líneas de procesamiento continuo (Fariñas et al., 2021). Los ultrasonidos sin contacto surgen como una herramienta poderosa en la industria alimentaria, por lo que estudios recientes han explorado la efectividad de esta técnica para futuras aplicaciones industriales. Fariñas et al. (2023) evaluaron los cambios fisicoquímicos en filetes de vacuno durante el salado en seco, obteniendo resultados comparables entre ultrasonidos de contacto y sin contacto. De manera similar, Fariñas et al. (2021) analizaron la viabilidad de los ultrasonidos acoplados por aire para caracterizar las propiedades texturales en hamburguesas de cerdo, encontrando correlaciones significativas entre la dureza y la velocidad ultrasónica, así como la capacidad de relajación total y la atenuación ultrasónica. De igual forma, Giacomozzi et al. (2024) midieron el contenido de grasa intramuscular en lomos de cerdo mediante ultrasonidos acoplados con aire, y encontraron que las velocidades ultrasónicas se aproximaron a las obtenidas mediante la técnica convencional de ultrasonidos de contacto directo. En este contexto, los ultrasonidos sin contacto se presentan como una solución prometedora para monitorizar la producción en línea a escala industrial, combinando fiabilidad, rapidez y carácter no invasivo. Por ello, el objetivo principal del presente trabajo consiste en evaluar la viabilidad de la técnica de ultrasonidos sin contacto para predecir el contenido de grasa intramuscular en filetes de lomo de vacuno.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se emplearon cintas de lomo de vacuno adquiridas de la industria cárnica “Elaborados Cárnicos Medina” (Buñol, Valencia). Se seleccionaron tres niveles de contenido graso (alto, medio y bajo), con tres muestras representativas por nivel, lo que resultó en un total de nueve cintas de lomo vacuno (FIGURA 1, izquierda). Para facilitar la manipulación y adaptar las muestras a las dimensiones de los equipos, cada cinta se cortó en filetes de 2.5 cm de grosor, obteniéndose un total de seis filetes por cinta (FIGURA 1, derecha). Las mediciones de los parámetros ultrasónicos y texturales se llevaron a cabo en condiciones de refrigeración (4°C).



FIGURA 1. Cinta de lomo de vacuno (izquierda) y filete de 2.5 cm de grosor (derecha).

2.2 Contenido de grasa

Para determinar el contenido de grasa intramuscular (IMF), se realizaron seis réplicas en cada una de las nueve cintas de lomo de vacuno, despreciando el tejido conectivo y los bordes de la pieza para obtener una muestra representativa del nivel de grasa intramuscular presente. La preparación de las muestras se realizó según el método 991.36 de la AOAC de extracción con disolventes (inmersión) para grasa (cruda) en la carne y los productos cárnicos (AOAC, 1997), y para realizar la extracción se utilizó el equipo FOSS ST255 Soxtec™ (FIGURA 2) empleando Éter de petróleo como disolvente.



FIGURA 2. Equipo de extracción con disolventes FOSS ST255 Soxtec™

2.3 Parámetros ultrasónicos

2.3.1 Montaje experimental

Para la obtención de las señales ultrasónicas se realizaron diez medidas en distintos puntos de cada filete. Para ello, se empleó el sistema ultrasónico mostrado en la FIGURA 3, operando en modo transmisión – recepción, formado por: un generador – receptor, un par de transductores piezoeléctricos (uno emisor y otro receptor), específicamente diseñados para adaptar adecuadamente la señal generada a la impedancia del aire (Sanchez-Jimenez et al., 2023) y un dispositivo digitalizador de la señal. A continuación, se especifican los componentes y condiciones de las mediciones realizadas:

- Generador - Receptor (5077 PR, Olympus, EE.UU.): se trabajó en la configuración de emisión de pulsos de onda cuadrada con amplitud de 400 V centrados a 100 Hz. La señal fue filtrada en la recepción por un paso bajo con frecuencia de corte de 0.1 MHz, pre amplificada a 20 dB y con una ganancia de 59 dB. Este dispositivo se encarga de enviar una señal eléctrica de excitación al transductor emisor y al digitalizador al mismo tiempo, esto lo hace para señalar el momento preciso en el que se ha enviado la señal a la muestra (trigger). Por otro lado, el transductor receptor recibe la señal para amplificarla y enviarla al osciloscopio.
- Transductores piezoeléctricos (US-BioMat Lab., ITEFI-CSIC, España): se emplearon transductores piezoeléctricos no enfocados acoplados por aire, con diámetro de 25 mm, frecuencia de 250 kHz. El transductor emisor se encarga de convertir la señal eléctrica de excitación en una onda

ultrasónica mediante la vibración del cristal piezoeléctrico. La onda viaja a través del aire, atraviesa la muestra y es recibida por el transductor receptor que se encarga de convertirla en señal eléctrica nuevamente, y enviarla al generador – receptor.

- Osciloscopio digital (NI 6501, National Instruments, EE.UU.): Velocidad de adquisición máxima (10 Mmuestras/s) promediando 250 señales, con una adquisición de 7000 puntos y un trigger del 10% de los puntos adquiridos, empleando como referencia la señal del aire. Este dispositivo se encarga de codificar la señal eléctrica y transformarla en una señal digital que pueda ser almacenada y analizada por el ordenador.



FIGURA 3. Sistema de ultrasonidos sin contacto para la medición de un filete de lomo de vacuno.

2.3.2 Análisis de señal ultrasónica

Una vez digitalizadas las señales (FIGURA 4), se utilizó el método de correlación cruzada descrito por Garcia-Perez et al. (2019) para calcular la variación del tiempo de vuelo (ΔTOF) entre dos señales (la señal que atraviesa la muestra y la señal de referencia que viaja por el aire). Los algoritmos del método de correlación cruzada se programaron en Labview™ 2018 (National Instruments, Austin, TX, EE. UU.) utilizando las funciones disponibles para la correlación cruzada y la interpolación, y las señales se normalizaron a la amplitud máxima (Garcia-Perez et al., 2019).

Posteriormente, se calculó la velocidad ultrasónica mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{L}{\Delta TOF + \frac{L}{v_{aire}}} \quad (1)$$

Donde: v = velocidad ultrasónica (m/s); L = espesor de la muestra (m) medido por un sensor laser (BAUMER); ΔTOF = variación del tiempo de vuelo (s); v_{aire} = velocidad ultrasónica en el aire según las condiciones ambientales (m/s).

Por otro lado, para calcular la amplitud y la integral de las señales ultrasónicas en el dominio temporal, se empleó el método descrito por Bowler et al. (2023), el cual determina la distancia pico-pico (PP) y la integral (INT).

$$PP = \max(X_t) - \max|\min(X_t)| \quad (2)$$

$$INT = \sum_{i=1}^N X_{z_{ti}} t_i \quad (3)$$

Donde: PP = distancia pico-pico (V), X_t = señal ultrasónica de cada muestra en el dominio temporal, INT = integral (V x μ s), $X_{z_{ti}}$ = representa cada una de las áreas de la señal X_t en el instante de tiempo t_i . Los algoritmos para determinar tanto la integral como la amplitud de la señal ultrasónica se programaron en Labview™ 2018 (National Instruments, Austin, TX, EE. UU.).

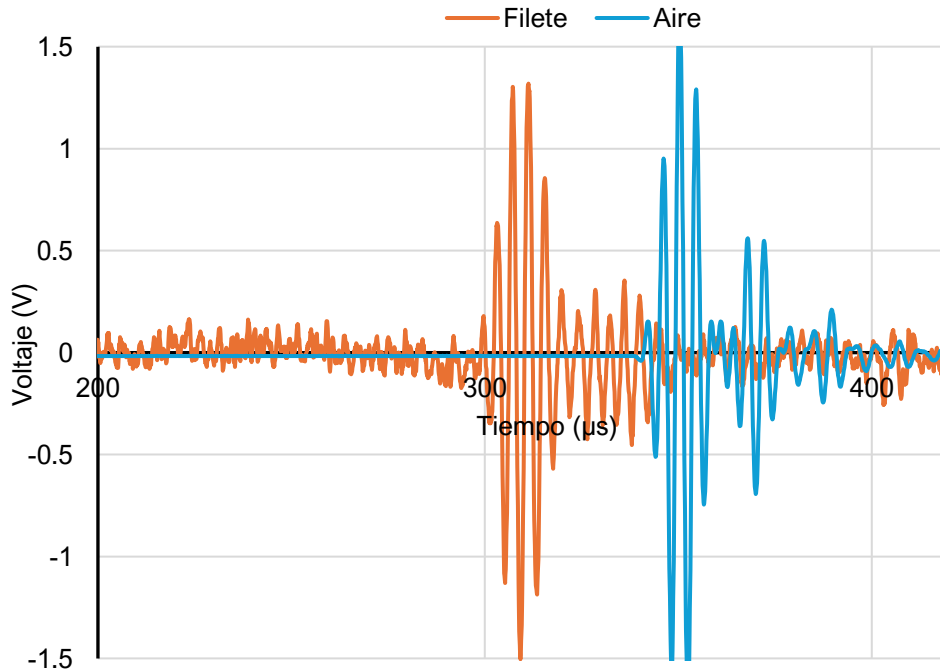


FIGURA 4. Ejemplo de señal ultrasónica que viaja por el aire (señal azul) y través de los filetes de lomo de vacuno (señal naranja).

2.4 Propiedades texturales

Para medir los parámetros texturales, de las muestras de lomo de vacuno se empleó el método de Análisis de Perfil de Textura (TPA) utilizando un texturómetro (TA. XT2i, Stable Micro Systems, UK), al que se acopló a la célula una sonda cilíndrica de 6 mm de diámetro, mostrado en la FIGURA 5. La velocidad de compresión fue de 2 mm/s y la deformación de compresión del 50%. Se realizaron diez mediciones en cada muestra, evitando los bordes, obteniendo 180 mediciones por cada nivel de contenido de grasa intramuscular. Luego a partir de la curva de fuerza (N) vs. distancia (mm), se calculó la fuerza máxima, siendo ésta el valor máximo de la fuerza (N) de compresión, relacionándose con la dureza (DU) de cada muestra.

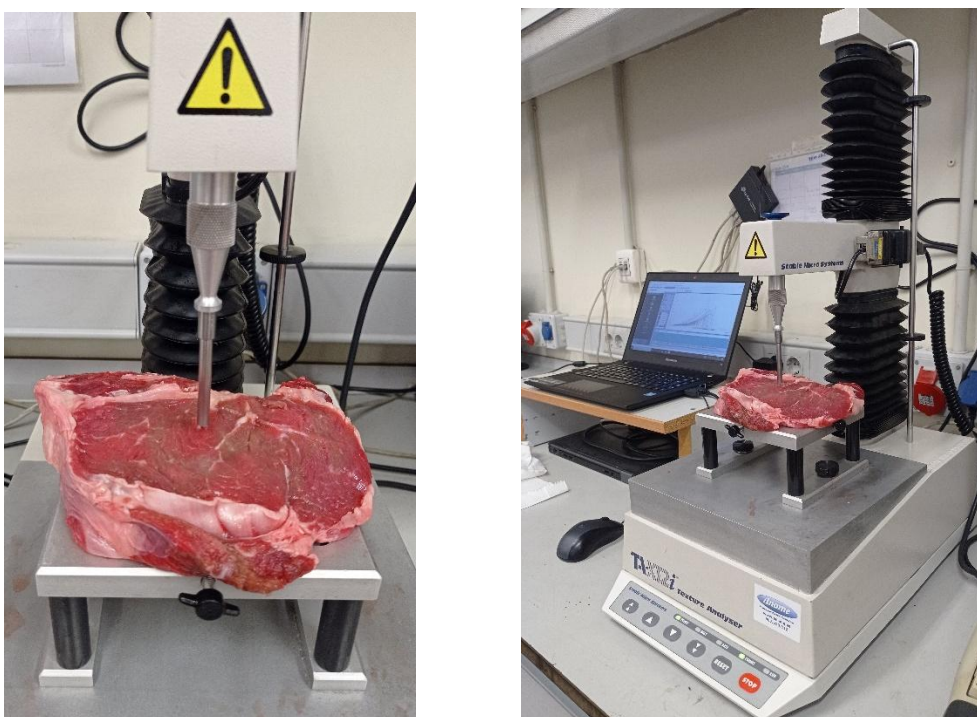


FIGURA 5. Texturómetro empleado para calcular los parámetros texturales de los filetes de lomo de vacuno.

2.5 Análisis estadístico

La influencia del contenido de grasa intramuscular en los parámetros tanto texturales como ultrasónicos de los filetes de lomo de vacuno, se evaluó estadísticamente utilizando el análisis de varianza (ANOVA), con un intervalo de confianza del 95%. El análisis estadístico se llevó a cabo con Statgraphics Centurion XVII (Statgraphics Technologies Inc., VA, EE.UU.).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evolución de los parámetros ultrasónicos en función del contenido de grasa intramuscular de los filetes de lomo de vacuno

Se observó un desplazamiento del punto de llegada de la señal ultrasónica en muestras con diferentes contenidos de grasa intramuscular. A continuación, en la FIGURA 6 se muestra un ejemplo de la señal ultrasónica para una muestra de alto, medio y bajo IMF.

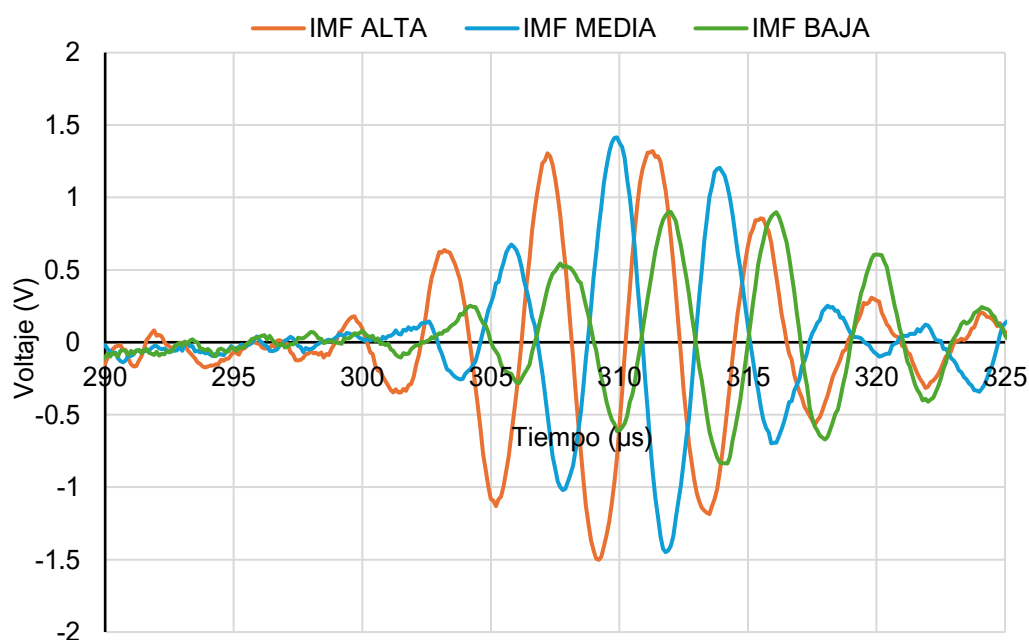


FIGURA 6. Señal ultrasónica en muestras con contenido de grasa intramuscular alto (IMF ALTA), medio (IMF MEDIA) y bajo (IMF BAJA).

En la FIGURA 6 se observa, que a una temperatura de 4°C, la señal ultrasónica en muestra con mayor IMF se adelanta con respecto a las muestras con medio y bajo IMF. Esto se debe a que, a temperaturas tan bajas, la grasa se encuentra predominantemente en estado sólido, lo que permite que los ultrasonidos se propaguen a mayor velocidad en comparación con muestras con menor contenido graso. Aunque las diferencias observadas también podrían deberse a diferencias en el espesor de la muestra. Resultados similares han sido encontrados por De Prados et al. (2015), quienes caracterizaron jamones mediante técnicas ultrasónicas, observando una considerable variación experimental en la respuesta ultrasónica según el contenido de humedad y grasa, siendo especialmente notable para altos contenidos de grasas totales (entre 20 y 28% b.h.). De acuerdo con este estudio, a bajas temperaturas, la composición de las muestras influye significativamente en sus propiedades texturales, alterando la relación sólido/líquido y facilitando la propagación de las ondas ultrasónicas a

través del tejido adiposo. De igual forma, lo anterior se ve reflejado en la TABLA 1, donde se muestra la variación de los parámetros ultrasónicos en función del IMF.

TABLA 1. Evolución de los parámetros ultrasónicos en función del contenido de grasa intramuscular (IMF).

IMF (% b.h.)	v (m/s)	Integral (V x μ s)	Amplitud (V)
1.33 \pm 0.09	1464 \pm 153 ^c	29 \pm 3 ^c	0.21 \pm 0.02 ^c
2.31 \pm 0.02	1562 \pm 156 ^b	36 \pm 3 ^b	0.27 \pm 0.03 ^b
3.59 \pm 0.37	1679 \pm 160 ^a	47 \pm 6 ^a	0.34 \pm 0.03 ^a

IMF: Contenido de grasa intramuscular; v: Velocidad ultrasónica. Se muestran valores medios y las desviaciones estándar. Las diferentes letras en la misma columna representan los grupos homogéneos establecidos para un intervalo LSD de 95% de significancia.

A partir de los resultados obtenidos, se observa un incremento en la velocidad ultrasónica medida a medida que aumenta el contenido de IMF en las muestras. En particular, un aumento de 0.98% b.h. en el IMF (al comparar muestras de bajo y medio contenido) se tradujo en un incremento de 98 m/s en la velocidad ultrasónica. Por otro lado, al comparar muestras con contenido medio y alto de IMF, un incremento del 1.3 % b.h. en la grasa resultó en un aumento de 116 m/s en la velocidad de propagación. En general, por cada 1% b.h. de grasa, la velocidad ultrasónica se incrementó en 81.64 m/s. Como se comentó anteriormente, este comportamiento podría atribuirse al incremento del ratio entre la grasa en estado sólido y líquido a baja temperatura, lo que aumenta la rapidez con la que se propaga la onda ultrasónica. Resultados similares fueron reportados por Benedito et al. (2001) en cuanto al incremento de la velocidad ultrasónica en función del contenido de grasa, a través de la evaluación de la composición de mezclas de carne cruda mediante ultrasonidos, obteniendo que a 4 °C las velocidades ultrasónicas en mezclas con contenido de grasa aproximado al 30% en base húmeda podían superar los 1550 m/s. Adicionalmente, se estudió la tendencia que siguen los valores medios de velocidades ultrasónicas con respecto al contenido de IMF, con un intervalo LSD del 95%, la cual se muestra en la FIGURA 7.

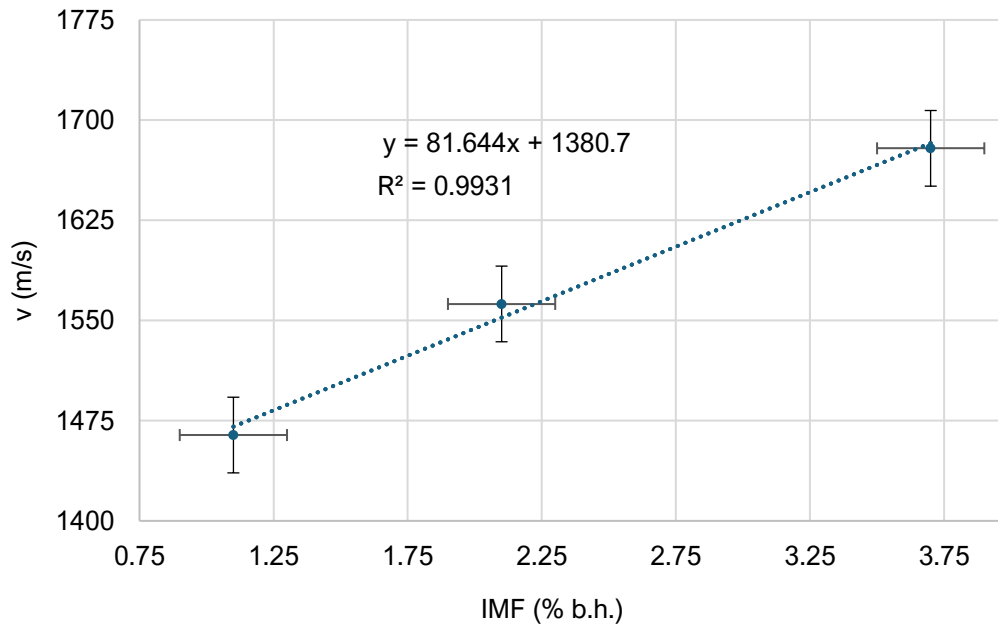


FIGURA 7. Relación entre la velocidad ultrasónica (v) de los filetes de lomo de vacuno con el contenido de grasa intramuscular (IMF). Se muestran los valores medios e intervalos LSD (95%).

Al realizar el estudio estadístico, se obtuvo un p valor igual a 0.0352 donde al ser menor a 0.05 se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las velocidades ultrasónicas de las muestras con distinto contenido de IMF. El incremento de la velocidad con respecto al contenido de grasa siguió un modelo lineal ($R^2=0.99$, FIGURA 7). Tendencias similares han sido obtenidas por Fariñas et al. (2021) quienes emplearon ultrasonidos acoplados por aire para la caracterización de hamburguesas de cerdo, reportando un aumento exponencial en la velocidad ultrasónica con el contenido de grasa total en las muestras a 5 °C. Estos investigadores han observado que a medida que el contenido de grasa aumenta, su rigidez (módulo elástico) también se incrementa, mientras que su densidad disminuye ligeramente. Esta combinación de cambios provoca que las ondas ultrasónicas se propaguen a través de la muestra a mayor velocidad.

Por otro lado, en la en la TABLA 1 también se presentan los cambios relacionados con el nivel de energía de la señal ultrasónica de los filetes, los cuales se reflejan a través del incremento en la integral y la amplitud de la señal ultrasónica a medida que aumenta su contenido de IMF. Las modificaciones de amplitud e integral de la señal se deben a los fenómenos de absorción, reflexión y dispersión-scattering de la señal (Whittaker et al., 1992), que son dependientes de la composición y estructura del material analizado. En los filetes de lomo de vacuno, al tratarse de muestras heterogéneas, los fenómenos de dispersión y reflexión en las interfaces internas influyen de manera significativa en la

atenuación de la señal, por lo que al aumentar la cantidad de grasa en el tejido se facilita la conexión entre las particular magras con el tejido conectivo, aumentando la cohesividad, y creando interfases más progresivas que mejoran la trayectoria de la onda ultrasónica (Fariñas et al., 2021).

3.2 Evolución de la dureza de los filetes de lomo de vacuno en función del contenido de grasa intramuscular

Se estudió la influencia del contenido de grasa intramuscular en la dureza de las muestras. En la FIGURA 8 se muestran los valores medios de la dureza con un intervalo LSD del 95%, para los distintos niveles de grasa.

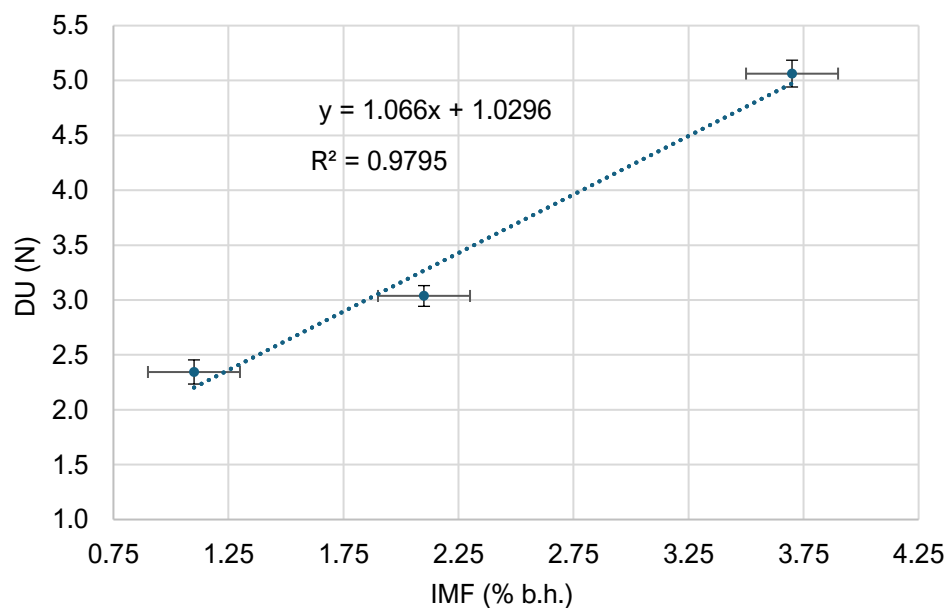


FIGURA 8. Relación entre la dureza (DU) de los filetes de lomo de vacuno y el contenido de grasa intramuscular (IMF). Se muestran los valores medios e intervalos LSD (95%).

Al realizar el estudio estadístico, se obtuvo un p valor igual a 0.0012 donde al ser menor a 0.05 se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las durezas de las muestras con distinto contenido de IMF. Se observó que el aumento del contenido de IMF en las muestras se asoció con un incremento en la dureza ($R^2 = 0.98$). En particular, al comparar muestras con bajo y medio contenido de IMF, un aumento del 0,98 % b.h. de grasa resultó en un incremento de 0.7 N en la dureza. Por otro lado, al pasar de un contenido medio a alto de IMF, con un aumento del 1.3 % b.h. de grasa, la dureza se incrementó en 2 N. En general, por cada 1 % de incremento en el contenido de grasa, la dureza de la muestra aumentó aproximadamente 1.07 N. Dicho incremento está relacionado con la cristalización de la grasa a bajas temperaturas (en este caso 4°C). Widlak et al. (2001) han reportado que las propiedades elásticas de las redes grasas cristalizadas no sólo dependen de la distribución espacial y las propiedades

intrínsecas de las partículas que los componen, sino también de la cantidad de material sólido presente en la red. Por lo que a medida que se incrementa el IMF en la muestra aumenta la cantidad de grasa cristalizada, produciendo un aumento de la dureza del material.

Fariñas et al. (2021), caracterizaron las propiedades texturales de hamburguesas de cerdo y observaron que a 5 °C, la dureza aumentó linealmente con el contenido de grasa ($r = 0,91$), obteniendo la mayor cantidad de dureza (7.09 N) para el 80% de grasa añadida, y la menor cantidad (3.76 N) para el 0% de grasa añadida. Aunque los valores difieren de aquellos encontrados en este estudio, bien sea por la naturaleza de las muestras empleadas (hamburguesas de cerdo) o a las diferencias técnicas para realizar el TPA, (los autores emplearon una sonda con igual superficie (6 mm) pero con menor porcentaje de deformación (25%) y menor velocidad de compresión (1mm/s)). Es importante destacar que se observa una tendencia similar en el aumento de la dureza a medida que se incrementa el contenido de grasa en las muestras, debido a que la grasa presenta un módulo de Young elástico más alto a 5 °C que el tejido magro. En este mismo contexto, Corona et al. (2014) caracterizaron a través de ultrasonidos y pruebas texturales la cristalización de la grasa de cerdo durante el almacenamiento en frío. Los autores han reportado que al almacenar a una misma temperatura (0 °C) diferentes tipos de grasa de cerdo, se obtiene una textura más dura a medida que aumenta el contenido de grasa, debido al incremento de la relación sólido/líquido en las muestras.

3.3 Correlación entre los parámetros ultrasónicos y la dureza de las muestras con distintos niveles de grasa

En la FIGURA 9, se muestra la relación entre la velocidad (parámetro ultrasónico) y la dureza (parámetro textural) entre las muestras con distinto contenido de IMF.

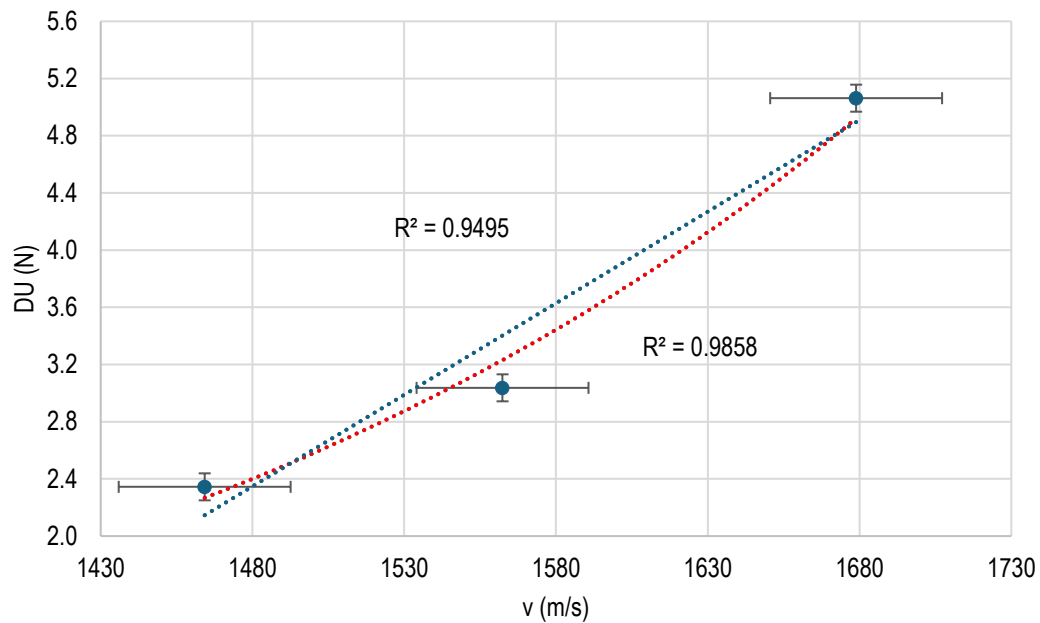


FIGURA 9. Correlación entre la dureza (DU) y la velocidad ultrasónica (v) en los filetes de lomo de vacuno. Se muestran valores medios e intervalos LSD (95%).

Se encontró que la relación entre la dureza y la velocidad ultrasónica sigue un comportamiento ascendente donde la correlación lineal tiene un $R^2 = 0.94$ y la correlación exponencial tiene un $R^2 = 0.98$. Si bien es cierto que en las correlaciones únicamente se utilizan tres niveles de IMF, es importante resaltar que es complejo obtener muestras de lomo de vacuno con mayores contenidos de grasa intramuscular y que a su vez sean de la misma raza. Sin embargo, la tendencia de los hallazgos anteriores se corresponde con los resultados reportados por Corona et al. (2013) donde relacionaron la velocidad ultrasónica con la raíz cuadrada del módulo elástico en jamones ibéricos, comprobando que existe una relación significativa entre ambas variables y que se comportan igualmente de manera lineal con coeficientes de regresión iguales a 0.87 para lotes de Babilla y 0.84 para lotes de Punta. Asimismo, Fariñas et al. (2021) encontraron una correlación lineal ($R^2 = 0.89$) entre la dureza y la velocidad ultrasónica en hamburguesas de cerdo, donde atribuyen el aumento de la velocidad de la onda ultrasónica a modificaciones de la densidad hacia valores más bajos y/o al mayor módulo elástico del material.

Adicionalmente, se estudió la relación existente entre la dureza de las muestras y los niveles de energía de la señal ultrasónica, las cuales se presentan en la FIGURA 10 y la FIGURA 11

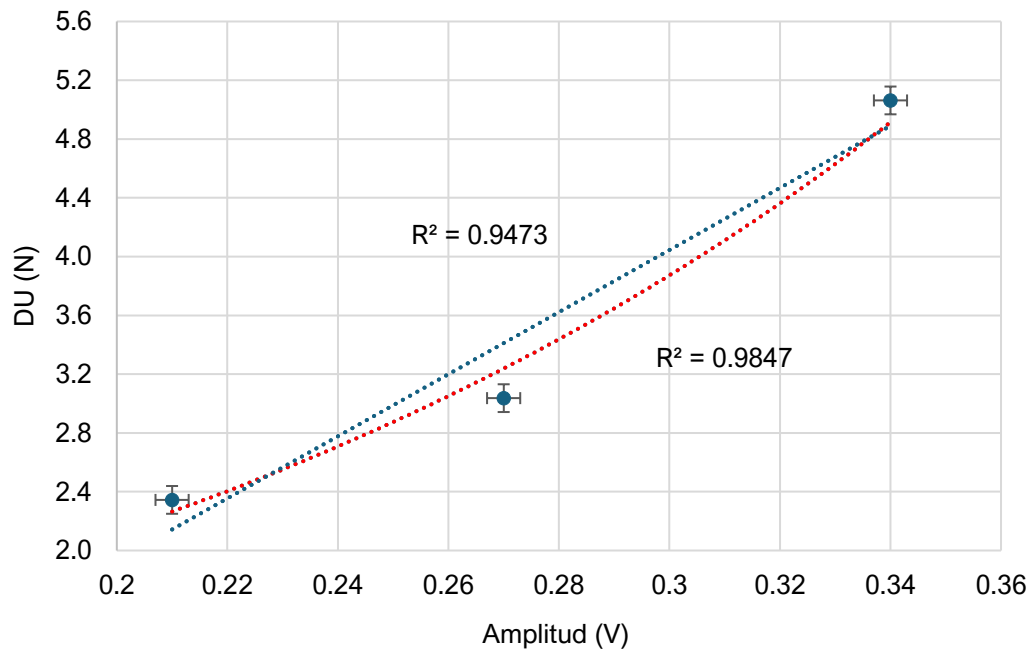


FIGURA 10. Correlación entre la dureza (DU) y las amplitudes de las señales ultrasónicas de los filetes de lomo de vacuno. Se muestran valores medios e intervalos LSD (95%).

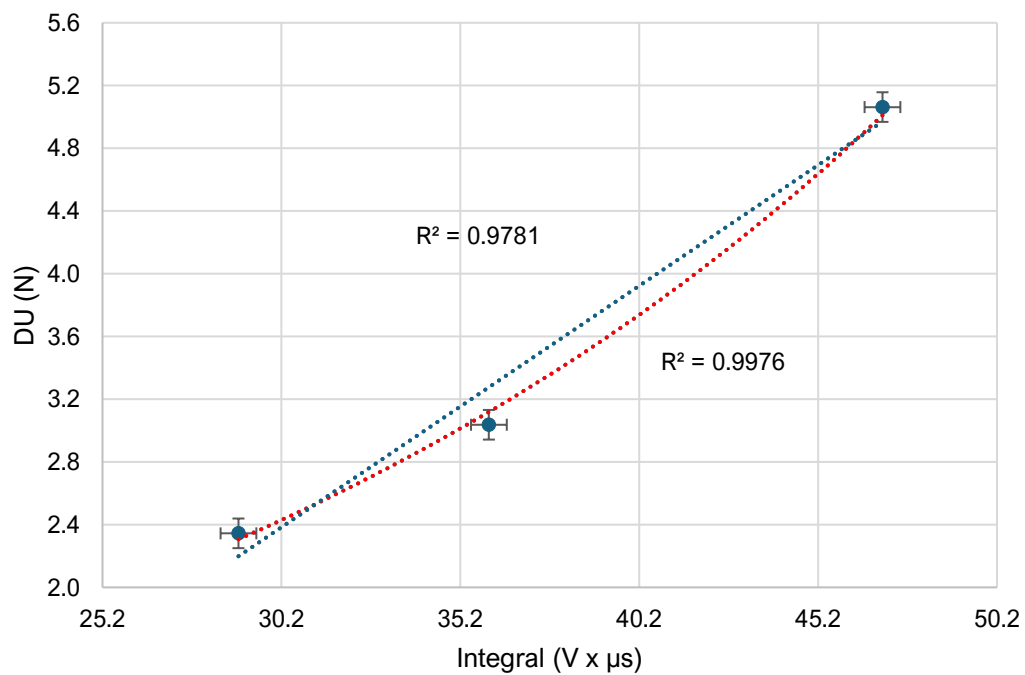


FIGURA 11. Correlación entre la dureza (DU) y las integrales de las señales ultrasónicas de los filetes de lomo de vacuno. Se muestran valores medios e intervalos LSD (95%).

A partir de los resultados anteriores se puede observar que existe igualmente una relación creciente entre la dureza que presentan las muestras y la amplitud e integral de la señal ultrasónica que las atraviesa, que podría cuantificarse con un patrón lineal ($R^2 = 0.94$) y/o exponencial ($R^2 = 0.98$) para la amplitud y un patrón lineal ($R^2 = 0.97$) y/o exponencial ($R^2 = 0.99$) para la integral. Como se ha expuesto anteriormente, la cristalización de las grasas a bajas temperaturas podría causar el aumento de la dureza en el lomo cuando se incrementa su contenido de grasa intramuscular. De igual forma, este aumento de grasa tiene el efecto de crear interfases más suaves y con menos espacios entre las partículas magras, disminuyendo la atenuación de la energía de la onda ultrasónica, viéndose reflejado en el aumento tanto de su amplitud como de su integral. Resultados similares fueron reportados por Fariñas et al. (2021), quienes observaron que al aumentar el contenido graso en hamburguesas de carne de cerdo, se produce un cambio en sus propiedades mecánicas, donde la respuesta elástica del material se vuelve más dominante en comparación con su respuesta viscosa, lo que origina una disminución en la atenuación ultrasónica en la hamburguesa.

Posteriormente, se realizó la comparación de los parámetros ultrasónicos y la dureza a través de sus coeficientes de variación (CV), los cuales se presentan en la TABLA 2.

TABLA 2. Análisis de la variabilidad de los parámetros ultrasónicos y texturales en función del contenido de grasa intramuscular.

IMF (% b.h.)	DU (N)	CV (%)	v (m/s)	CV (%)	Integral (V x μ s)	CV (%)	Amplitud (V)	CV (%)
1.33 \pm 0.09	2.3 \pm 0.4 ^c	16%	1464 \pm 153 ^c	10%	29 \pm 3 ^c	10%	0.21 \pm 0.02 ^c	9%
2.31 \pm 0.02	3.0 \pm 0.6 ^b	18%	1562 \pm 156 ^b	10%	36 \pm 3 ^b	9%	0.27 \pm 0.03 ^b	9%
3.59 \pm 0.37	5.1 \pm 0.9 ^a	17%	1679 \pm 160 ^a	10%	47 \pm 6 ^a	13%	0.34 \pm 0.03 ^a	10%

IMF: Contenido de grasa intramuscular; DU: Dureza; CV: Coeficientes de variación; v: Velocidad ultrasónica. Se muestran valores medios y desviaciones estándar. Las diferentes letras en la misma columna representan los grupos homogéneos establecidos para un intervalo LSD de 95% de significancia.

En relación a la variabilidad de las diferentes medidas, (TABLA 2) se observó que los coeficientes de variación de los parámetros ultrasónicos son menores que los coeficientes de variación de los valores de la dureza, para todos los niveles de IMF analizados. Si bien la alta variabilidad de la dureza puede atribuirse a la naturaleza heterogénea de las muestras es importante considerar que se realizaron el mismo número de mediciones con ambos equipos (ultrasonidos y textura), lo que demuestra que la técnica ultrasónica proporciona una mayor precisión para predecir el contenido de grasa intramuscular, incluso en muestras heterogéneas. En este mismo sentido, Corona et al. (2013) reportaron que el uso de ultrasonidos es una tecnología fiable al estudiar los cambios en las

propiedades texturales del jamón ibérico envasado al vacío, siendo la elevada heterogeneidad de las muestras de jamón, el principal motivo de la variabilidad encontrado.

En base a lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que la técnica de ultrasonidos sin contacto es viable para predecir el contenido de grasa intramuscular en filetes de lomo de vacuno, garantizando el control de calidad sobre el producto, sin comprometer la seguridad alimentaria durante su caracterización.

4. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas a partir de este estudio:

1. La variación en los parámetros texturales y ultrasónicos de los filetes de lomo de vacuno está influenciada por la relación sólido/líquido de la fracción grasa. A 4°C, la grasa se encuentra predominantemente en estado sólido, lo que incrementa la dureza del tejido y afecta a la propagación de las ondas ultrasónicas.
2. La velocidad ultrasónica se identificó como un parámetro eficaz para diferenciar filetes de lomo de vacuno con distintos niveles de grasa intramuscular, con un incremento de 81.64 m/s por cada aumento 1 % b.h. de contenido de grasa intramuscular.
3. La dureza demostró ser un indicador relevante para predecir el contenido de grasa intramuscular en los filetes de lomo de vacuno.
4. El nivel de energía de la señal ultrasónica mejora con el aumento de contenido de grasa intramuscular, viéndose reflejado en un aumento de su amplitud e integral. Esto podría atribuirse a la formación de interfases internas más suaves, disminuyendo las pérdidas de energía de la onda ultrasónica en su propagación por el tejido.
5. La técnica de ultrasonidos sin contacto mostró una menor variabilidad experimental que el método de Análisis de Perfil de Textura, presentando menores coeficientes de variación en todos los parámetros estudiados, para cada nivel de grasa intramuscular.
6. Se observó una adecuada correlación entre los parámetros ultrasónicos (velocidad, amplitud e integral) con la dureza de los filetes de lomo de vacuno.
7. Estos hallazgos respaldan el uso de la tecnología de ultrasonidos sin contacto como un método fiable para predecir el contenido de grasa intramuscular en filetes de lomo de vacuno, lo que mejoraría el control de calidad que se realiza actualmente en la industria cárnica.

Este trabajo fin de máster contribuye a los siguientes objetivos de desarrollo sostenible (ODS):

Objetivo 3. Salud y bienestar. La técnica de ultrasonido sin contacto puede garantizar la calidad y seguridad alimentaria, lo que se traduce en mejorar la calidad de vida y salud en la población consumidora.

Objetivo 8. Trabajo decente y crecimiento económico. La implantación de sistemas ultrasónicos en la industria supondría una mejora no sólo a nivel económico de la empresa al garantizar la calidad de sus productos, sino que también puede representar beneficios para los trabajadores involucrados en el sector al brindarle nuevas herramientas que mejoren el puesto de trabajo, siendo más eficaces y productivos.

Objetivo 9. Industria, innovación e infraestructura: la técnica de ultrasonidos sin contacto permite realizar controles precisos de forma no destructiva, lo que mejora la eficiencia y la calidad en los procesos industriales.

Objetivo 12. Producción y Consumo Responsables: Esta técnica también es capaz de optimizar el uso de materias primas y energía durante la producción, brindando productos de alta calidad con un menor impacto ambiental.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del proyecto ULTRADIGITAL (AGROALNEXT/2022/045), el cual forma parte del programa AGROALNEXT, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos europeos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1), así como por la Generalitat Valenciana.

6. REFERENCIAS

- AOAC. (1997). Official Method 991.36 Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemist. DOI: http://www.aocofficialmethod.org/index.php?main_page=product_info&products_id=2528
- Bowler, A.; Ozturk, S.; di Bari, V.; Glover, Z. J; Watson, N. J. 2023. Machine Learning and Domain Adaptation to Monitor Yoghurt Fermentation Using Ultrasonic Measurements. *Food Control*, 147 (109622). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109622>
- Corona, E.; García-Pérez, J.V.; Mulet, A.; Benedito, J. 2013. Ultrasonic assessment of textural changes in vacuum packaged sliced Iberian ham induced by high pressure treatment or cold storage. *Meat Science*, 95 (2), 389-395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.05.008>
- Corona, E.; García-Pérez, J. V.; Ventanas, S.; Benedito, J. 2014. Ultrasonic Characterization of the Fat Source and Composition of Formulated Dry-Cured Meat Products. *Food Science and Technology International*, 20 (4). 275-85. DOI: <https://doi.org/10.1177/1082013213482915>.

- Corona, E.; García-Pérez, J. V.; Santacatalina, J. V.; , Ventanas, S.; Benedito, J. 2014. Ultrasonic Characterization of Pork Fat Crystallization during Cold Storage. *Journal of Food Science*, 79 (5). DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12410>.
- De Prados, M.; García-Pérez, J. V.; Fulladosa, E.; Benedito, J.; Gou, P; Muñoz, I. 2015. Non-destructive determination of fat content in green hams using ultrasound and X-rays. *Meat Science*, 104. 37-43. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.01.015>
- Ensminger, D.; Bond, L. J. 2012. *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications*. 3er ed. CRC Press. Boca Raton. DOI: <https://doi.org/10.1201/b11173>.
- Fariñas, L.; Contreras, M.; Sanchez-Jimenez, V.; Benedito, J.; Garcia-Perez, J. V. 2021. Use of Air-Coupled Ultrasound for the Non-Invasive Characterization of the Textural Properties of Pork Burger Patties. *Journal of Food Engineering*, 297. 110481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110481>.
- Fariñas, M. D.; Sanchez-Jimenez, V.; Benedito, J.; García-Pérez, J. V. 2023. Monitoring Physicochemical Modifications in Beef Steaks during Dry Salting Using Contact and Non-Contact Ultrasonic Techniques. *Meat Science*, 204. 109275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109275>.
- Giacomozzi, A. S.; Calvo, L.; Gómez, T.; Benedito, J.; Garcia-Perez, J. V.. *Contactless assessment of intramuscular fat content in pork loin by using air-coupled ultrasound*. En Conference of Food Engineering. Seattle, Washington, USA. 25-28 de Agosto 2024.
- Garcia-Perez, J. V.; De Prados, M.; Martinez, G.; Gomez Alvarez-Arenas, T. E.; Benedito, J. 2019. Ultrasonic Online Monitoring of the Ham Salting Process. Methods for Signal Analysis: Time of Flight Calculation. *Journal of Food Engineering*, 263. 87-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.032>.
- Jiménez, A.; Rufo, M.; Paniagua, J. M.; González-Mohino, A.; Antequera, T.; Perez-Palacios, T. 2023. Acoustic Characterization Study of Beef Loins Using Ultrasonic Transducers. *Sensors*, 23. 9564. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23239564>.
- Leighton, Timothy G. 2007. What is ultrasound?. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 93 (1). 3-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.026>.
- Sanchez-Jimenez, V.; Collazos-Escobar, G. A.; González-Mohin, A.; Gomez Alvarez-Arenas, T. E.; Benedito, J.; Garcia-Perez, J. V. 2023. Non-invasive monitoring of potato drying by means of air-coupled ultrasound. *Food Control*, 148. 109653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109653>
- Whittaker, A. D.; Park, B.; Thane, B. R.; Miller, R. K.; Savell, J. W. 1992. Principles of Ultrasound and Measurement of Intramuscular Fat. *Journal of Animal Science*, 70 (3). 942-52. DOI: <https://doi.org/10.2527/1992.703942x>.
- Widlak, N.; Hartel, R.; Narine, S. 2001. *Crystallization and Solidification Properties of Lipids*. AOCS Press, Champaign, Illinois.