

DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CARACTERIZACIÓN ULTRASÓNICA DE ALIMENTOS. APLICACIÓN A LA MONITORIZACIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL JAMÓN CURADO

Marina Contreras Ruiz, José Benedito Fort, José Vicente García Pérez¹

RESUMEN

El control automático de procesos supone una gran ventaja para la industria agroalimentaria puesto que permite conocer la evolución de la composición o la estructura de un producto a lo largo de un proceso. Por ello, en este trabajo se llevó a cabo el desarrollo de un sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos y su posterior aplicación al proceso de elaboración de jamón curado.

El sistema desarrollado registra los cambios que sufre la onda ultrasónica al atravesar el alimento y que posteriormente, se pueden relacionar con la composición o estructura del alimento. Los principales componentes del sistema ultrasónico son: generador-receptor, transductores emisor y receptor, osciloscopio, ordenador y cilindro de posicionamiento. El sistema permite posicionar de forma automática el transductor emisor realizando un acople adecuado con el alimento.

El sistema desarrollado se utilizó en la monitorización de las primeras etapas de la elaboración de jamón curado. El parámetro ultrasónico utilizado para la caracterización fue la velocidad de los ultrasonidos, la cual fue medida en los jamones frescos, después del salado (4, 6, 8 y 11 días), después del reposo y durante el secado-maduración. Los resultados mostraron que a mayor tiempo de salado, mayor es la velocidad de los ultrasonidos. Además, a medida que transcurrió el proceso de elaboración se incrementó la velocidad ultrasónica debido, entre otros factores, al descenso del contenido en agua. Así, las medidas ultrasónicas realizadas con el sistema desarrollado podrían ser utilizadas a nivel industrial para monitorizar el proceso de elaboración de jamón curado de forma no destructiva, rápida y económica.

PALABRAS CLAVE: caracterización, control, alimentos, ultrasonidos.

RESUM

El control automàtic de processos suposa un gran avantatge per a la indústria agroalimentària ja que permet conèixer l'evolució de la composició o l'estructura d'un producte al llarg d'un procés. Per això, en aquest treball es va dur a terme el desenvolupament d'un sistema automàtic de caracterització ultrasònica d'aliments i la seua posterior aplicació al procés d'elaboració de pernil curat.

¹Grupo Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n 46022, Valencia. España.

El sistema desenvolupat registra els canvis que patix l'onda ultrasònica en travessar l'aliment i que posteriorment, es poden relacionar amb la composició o estructura de l'aliment. Els principals components del sistema ultrasònic són: generador-receptor, transductors emissor i receptor, oscil·loscopi, ordinador i cilindre de posicionament. El sistema permet posicionar de forma automàtica el transductor emissor realitzant un acoble adequat amb l'aliment.

El sistema desenvolupat es va utilitzar en el monitoratge de les primeres etapes de l'elaboració de pernil curat. El paràmetre ultrasònic utilitzat per a la caracterització va ser la velocitat dels ultrasons, la qual va ser mesurada en els pernills frescos, després del salat (4, 6, 8 i 11 dies), després del repòs i durant l'asseccament-maduració. Els resultats van mostrar que a major temps de salat, major és la velocitat del ultrasons. A més, a mesura que va transcórrer el procés d'elaboració es va incrementar la velocitat ultrasònica degut, entre altres, al descens del contingut en aigua. Així, les mesures ultrasòniques realitzades amb el sistema desenvolupat podrien ser utilitzades a escala industrial per a monitoritzar el procés d'elaboració de pernil curat de forma no destructiva, ràpida i econòmica.

PARAULES CLAU: caracterització, control, aliments, ultrasons.

ABSTRACT

Automatic process control represents a great advantage for the food industry since it contributes to assess the composition or structure of a product throughout a process. Therefore, this work aims to develop an automatic system for the ultrasonic characterization of foodstuffs and its further application for monitoring dry-cured ham processing.

The developed system computes the changes suffered by the ultrasonic wave when passing through the foodstuff and subsequently, these changes can be linked to food composition or structure. The main components of the ultrasonic system are: pulser-receiver, emitter and receiver transducers, oscilloscope, computer and positioning cylinder. The system allows positioning automatically the emitter transducer with an adequate coupling with the food.

The developed system was used to monitor the early stages of the dry-cured ham processing. The ultrasonic parameter used for the characterization was the ultrasound velocity, which was measured in raw hams, after salting (4, 6, 8 and 11 days), after post-salting and during drying-curing. The experimental results showed that the longer the salting time, the higher the ultrasound velocity. In addition, an increase of the ultrasonic velocity was found during ham processing due to mainly the water content decrease. Thus, the ultrasonic measurements carried out with the developed system could be used in the industry to monitor the dry-cured ham processing in a nondestructive, fast and economical way.

KEY WORDS: characterization, control, foodstuffs, ultrasound.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe un creciente interés por parte de la industria agroalimentaria en el control automático de procesos. El desarrollo de tecnologías en línea que permitan estimar la composición y estructura de la materia prima de manera rápida y sin comprometer la integridad del producto supone una gran ventaja para la industria. Una de las tecnologías no destructivas, económica y relativamente fácil de implementar en línea son los ultrasonidos de señal. Los ultrasonidos de baja intensidad o de señal son ondas acústicas con una frecuencia superior al límite de audición humano (Awad et al., 2012). Las ondas ultrasónicas tienen una serie de parámetros ultrasónicos característicos, entre ellos la velocidad. Cuando dichas ondas interactúan con la materia, se absorben o se dispersan y por tanto su velocidad se ve alterada (McClements, 2004). La velocidad de los ultrasonidos es muy sensible a la organización molecular, por ello, su medida representa un método adecuado para determinar la composición, la estructura o el estado físico de los alimentos (Buckin et al., 2003).

La medida de la velocidad de ultrasonidos como método para controlar un proceso o determinar la calidad de alimentos se ha utilizado en numerosas ocasiones (Mulet et al., 1999) puesto que es el parámetro más simple y fiable de las determinaciones ultrasónicas. Resa et al. (2004) utilizaron la velocidad ultrasónica para determinar los cambios de composición durante la fermentación alcohólica, mientras que Benedito et al. (2001a) la emplearon para monitorizar la maduración del queso. En la industria cárnica, también se han realizado numerosos estudios con ultrasonidos de señal donde se relaciona su velocidad con la composición de productos cárnicos elaborados, como hicieron LLull et al. (2002) en sobrasada y Benedito et al. (2001b) en salchichas. Sin embargo, son muy pocos los estudios realizados en piezas cárnicas con integridad anatómica, como podría ser el jamón curado.

El jamón curado es un producto tradicional en muchos países. Su estabilidad se consigue principalmente con la etapa de salado, ya que la sal inhibe el crecimiento de microorganismos (Liu et al., 2013) y además contribuye a los cambios de sabor y textura deseados en el producto final. Esto hace que sea una de las etapas más importantes en el procesado de productos cárnicos crudo-curados. El salado de piezas con integridad anatómica, como el jamón, es complejo ya que las características biológicas y químicas de la carne son muy heterogéneas. Además, también influyen en el proceso de salado las variables de proceso, entre otras la temperatura, humedad relativa y posición en la pila (Fulladosa et al., 2015). Esto hace que la variabilidad en la absorción de sal entre lotes de jamones e incluso dentro de un mismo lote sea elevada. Así, aparecen jamones con una cantidad excesiva de sal que son rechazados por el consumidor. Mientras que si la cantidad de sal es insuficiente, pueden aparecer defectos sensoriales como pastosidad o texturas blandas, que también afectan a la aceptabilidad del consumidor (Morales et al., 2013). Por otra parte, hoy en día existe una gran preocupación por parte del consumidor por reducir la ingesta de sal en su

dieta debido a las enfermedades cardiovasculares con las que se relaciona. Por lo tanto, la oferta de productos bien caracterizados permite a los consumidores elegir los alimentos según sus necesidades o preferencias.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, es fundamental poder controlar la evolución de la composición del jamón durante el proceso de salado y posteriormente durante el secado-maduración con el fin de obtener lotes homogéneos de jamones crudo-curados con la cantidad de sal y textura deseada. Sin embargo, la caracterización de piezas enteras de carne resulta una tarea compleja. Una posible solución para controlar la variabilidad en cuanto a composición y cambios estructurales podría ser la monitorización del proceso de elaboración de jamón con el fin de clasificarlos en lotes más homogéneos. En este contexto, los ultrasonidos de señal son una tecnología muy útil que podría ser implantada en línea para la clasificación de los jamones de modo no destructivo.

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo de un sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos y su posterior aplicación a la monitorización del proceso de elaboración del jamón curado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos

DESCRIPCIÓN GENERAL

La figura 1 muestra un esquema del sistema automático desarrollado para la caracterización ultrasónica de alimentos, el cual se compone de siete elementos principales. El componente más novedoso empleado en el equipo es el brazo deslizante o cilindro de posicionamiento (Figura 1, ①), que comandado desde el ordenador (RS-485), se encarga de posicionar el transductor emisor (Figura 1, ②) (unido a su extremo móvil) en un punto determinado del alimento, confiriendo así el carácter automático al equipo. El transductor receptor (Figura 1, ③) está fijo sobre la plataforma de medida. Entre ambos transductores, se coloca el alimento y la señal ultrasónica se propaga del transductor emisor al transductor receptor. Esta señal ultrasónica es generada por el generador y recibida por el receptor, los cuales se encuentran integrados en un mismo módulo (Figura 1, ④). El osciloscopio (Figura 1, ⑤) se encarga de digitalizar la señal eléctrica que llega del generador-receptor en una señal que el ordenador sea capaz de procesar. Seguidamente se encuentra el ordenador (Figura 1, ⑥), encargado de comunicarse con el osciloscopio y con el cilindro de posicionamiento. Por último el controlador (Figura 1, ⑦), cuya función es controlar los movimientos del cilindro de posicionamiento a partir de las órdenes enviadas desde el ordenador.

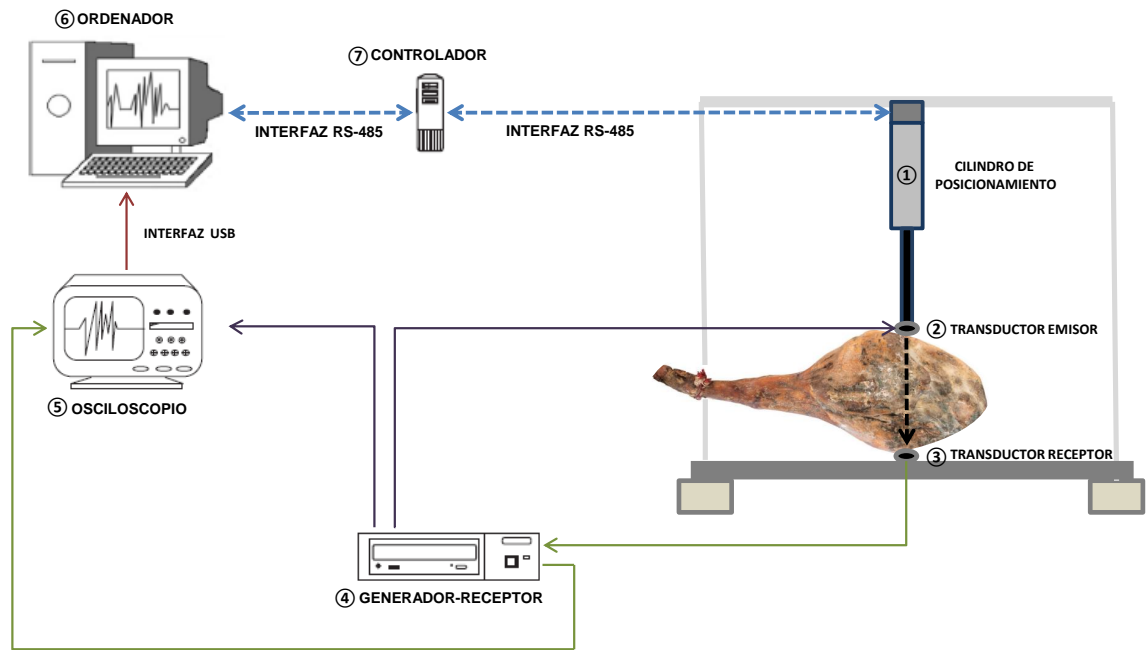


FIGURA 1. Esquema del sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos.

DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

A continuación, se detallan los distintos elementos que conforman el equipo automático de ultrasonidos:

- Brazo deslizante o cilindro de posicionamiento: (modelo LEY 16RB, SMC, Japan) se trata de un actuador eléctrico, formado por una carcasa, un vástago y un motor de giro paso a paso capaz de ejercer una fuerza máxima de empuje de 7.54 kg, la cual se puede ajustar en función de las características del producto que se vaya a medir. En el interior de la carcasa se encuentra el vástago (de 300 mm de carrera), que es accionado por el motor paso a paso. La velocidad máxima de movimiento del cilindro es de 250 mm/s y el paso del husillo (distancia entre dos ranuras consecutivas del tornillo del cilindro) es de 5 mm.

- Transductores: (modelo A314S, Panametrics, U.S.A.) se utilizaron dos transductores piezoeléctricos de banda estrecha de 1 MHz.

- Generador-receptor: (modelo 5058PR, Panametrics, U.S.A.) se trata de un módulo que genera, recibe y acondiciona impulsos eléctricos. Los principales parámetros de configuración son: amplitud del pulso de excitación, frecuencia de repetición y ganancia de amplificación.

- Osciloscopio: (modelo USB-5133, National Instruments, U.S.A.). Los principales parámetros de configuración son: trigger (señal de disparo), velocidad de adquisición (máxima 100 Mmuestras/s), resolución (8 bits) y número de puntos almacenados (4 MB/canal). Se encuentra conectado con el ordenador a través de la interfaz USB.

- Ordenador: ejecuta un software específico desarrollado en LabView2015™ (National Instruments, U.S.A.) para la adquisición y tratamiento de los datos obtenidos a partir de las señales ultrasónicas.

- Controlador: (modelo LECP6N, SMC, Japan), es el elemento encargado de controlar el movimiento del brazo deslizante. Puede ser programado para 64 posiciones distintas con los siguientes parámetros de configuración: posición, velocidad de posicionamiento, aceleración y deceleración, fuerza de empuje, velocidad de empuje y máxima distancia de empuje.

DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

En la figura 2 se muestra el sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos. El proceso de funcionamiento del equipo se divide en dos partes: posicionamiento del brazo deslizante y adquisición y tratamiento de la señal ultrasónica.



FIGURA 2. Sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos.

En primer lugar, el transductor emisor colocado en el extremo inferior del brazo deslizante debe posicionarse sobre la superficie del alimento realizando una fuerza que permita el buen contacto/acople entre ambos y obviamente sin dañar la superficie del alimento. Los elementos que intervienen en el posicionamiento del transductor son ordenador, controlador y brazo deslizante. La comunicación entre el ordenador y el controlador del brazo es bidireccional, pues el ordenador manda información de la posición a la cual debe moverse el brazo y una vez está posicionado, el controlador envía al ordenador la posición del transductor. El posicionamiento del transductor se realiza en dos pasos claramente diferenciados. En el primer paso, denominado de posicionamiento, el transductor baja a la velocidad máxima (250 mm/s) hasta una posición fija determinada previamente. Inmediatamente después, comienza el modo de empuje, en el cual el brazo se mueve a menor velocidad hasta alcanzar la superficie del producto y ejercer una determinada fuerza de empuje previamente fijada (máximo 7.54 kg). Mediante el ajuste de la fuerza de empuje, el acople del transductor puede hacerse extensible a todo tipo de alimentos en función de su dureza.



FIGURA 3. Brazo deslizante en posición inicial (izquierda) y en contacto con el alimento (derecha).

Una vez el transductor emisor se encuentra colocado en el punto de medida deseado del alimento, comienza la segunda parte del proceso. Para ello, el generador-receptor genera un pulso eléctrico que es enviado al transductor emisor y al mismo tiempo envía la señal de disparo al osciloscopio para sincronizar la medida y que empiece la adquisición de la señal digitalizada. La señal enviada por el generador-receptor llega hasta el transductor emisor, lo excita y convierte la señal eléctrica en una vibración que se propaga a través de la muestra hasta llegar al transductor receptor, el cual realiza el proceso inverso, es decir, convierte la vibración en una señal eléctrica proporcional a la vibración recibida. A continuación, el generador-receptor recibe y acondiciona esta señal. El acondicionamiento de la señal consiste en el filtrado y amplificación de la misma. Seguidamente, la señal eléctrica llega al osciloscopio donde es digitalizada y enviada al ordenador (Figura 4).

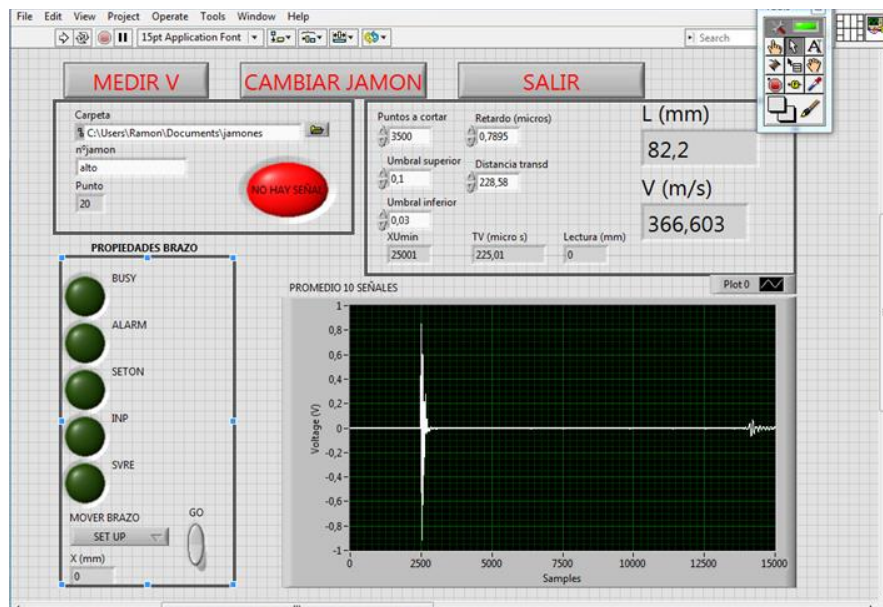


FIGURA 4. Pantalla de la aplicación de gestión del sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos.

La señal adquirida contempla no únicamente el tránsito de la onda por el producto sino también por todos los elementos eléctricos (cables, etc...) desde que es generada. Así, es necesario el cálculo del tiempo de retardo, que es el tiempo que contempla el tránsito de la señal por todos los componentes a excepción de la muestra. Para ello, se realizó una calibración con cilindros de metacrilato de distinta altura en los que se midió el tiempo de vuelo. En la Figura 5, se representa el tiempo de vuelo para los diferentes cilindros, la intersección de la recta obtenida con el eje de ordenadas del gráfico coincide con el tiempo de retardo ($0.7895 \mu\text{s}$).

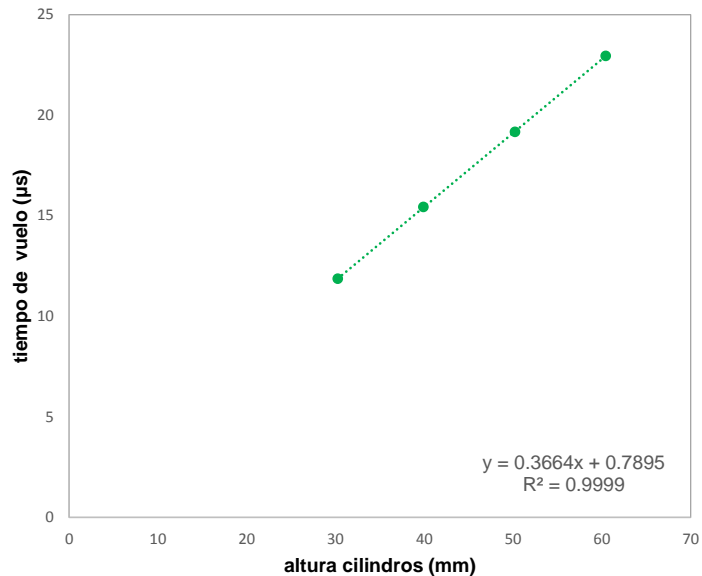


FIGURA 5. Gráfica empleada para la obtención del tiempo de retardo.

Posteriormente, la señal ultrasónica digitalizada y almacenada en el ordenador debe analizarse. El análisis para el cálculo de la velocidad ultrasónica a partir del tiempo de vuelo se realiza en el dominio temporal. El procedimiento más común del cálculo del tiempo de vuelo es el del umbral de energía donde se busca el primer punto de la señal digitalizada (Figura 6) que supere un umbral de energía (umbral superior) pre-fijado (0.1 V). Una vez localizado, se retrocede hasta un umbral inferior (0.03 V) y por tanto se considera ese punto como el punto de llegada de la señal al transductor receptor. A partir de ese valor, se calcula el tiempo de vuelo restando el valor del tiempo de retardo. El análisis de la señal ultrasónica y el cálculo del tiempo de vuelo se realiza a partir de la aplicación desarrollada en LabView2015™ (National Instruments) (Figura 4). El cociente entre el espesor de la muestra proporcionado por el brazo deslizante y el tiempo de vuelo proporciona la velocidad ultrasónica.

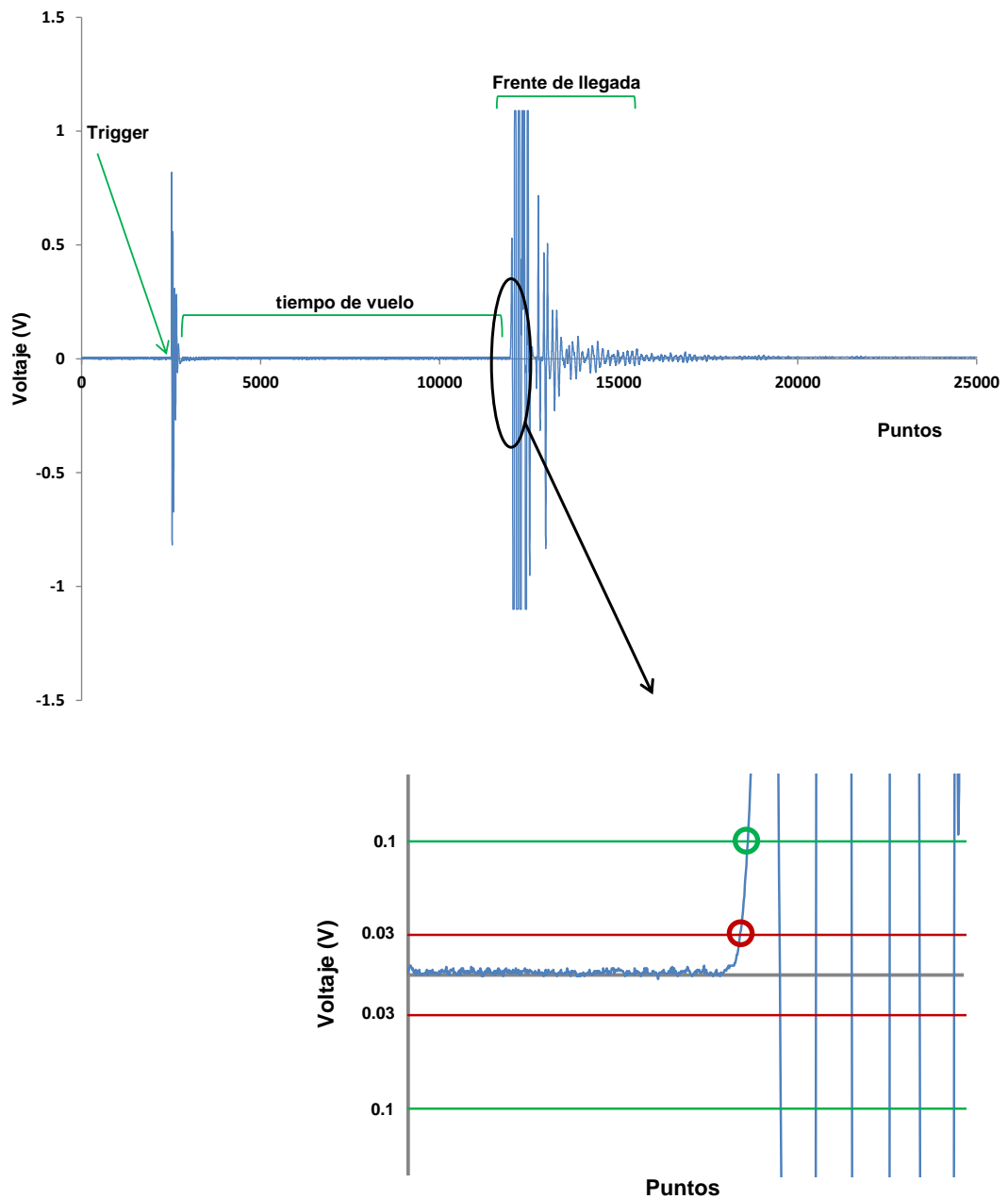


FIGURA 6. Método del cálculo del tiempo de vuelo con el método del umbral de energía para la medida de velocidad ultrasónica.

Monitorización del proceso de elaboración de jamón curado

El sistema automático de caracterización ultrasónica de alimentos desarrollado se empleó para monitorizar las primeras etapas del proceso de elaboración de jamón curado. La velocidad ultrasónica se midió a lo largo del proceso en cuatro ocasiones: en la materia prima, tras el salado, después de la etapa de reposo y durante el secado. En todas las ocasiones fue medida a 4°C excepto en la etapa de secado-maduración, que se midió a 22°C. Los jamones empleados como materia prima en este trabajo procedentes de la raza Large White fueron seleccionados por el IRTA (Monells, Girona). Se

trabajó con dos lotes, lote 1 y 2, formados por 96 y 104 jamones respectivamente. Antes del inicio del procesado, los jamones se pesaron (entre 9.7-13.9 kg) y se midió su pH (entre 5.37-5.55). El proceso de elaboración de jamón curado se dividió en tres etapas: salado, reposo y secado-maduración. En primer lugar se realizó el salado. En esta etapa, los jamones frescos se colocaron en una cámara de refrigeración y se cubrieron completamente con sal sólida (pila de una capa). La temperatura de la cámara fue de $2\pm 1^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa estuvo entre el 80-95%. Según Barat et al. (2004) el tiempo de salado puede fluctuar entre 1 y 1.5 días por kilogramo de materia prima, así y considerando que en los jamones frescos el peso medio del lote 1 fue 12 ± 0.5 kg y en el lote 2 fue 11.4 ± 1.5 kg, el tiempo de salado oscilaría entre 10 y 19 días. Sin embargo, los tiempos de salado elegidos en el estudio fueron 4, 6, 8 y 11 días debido a que dichos jamones están integrados en un proyecto de investigación donde se pretende obtener jamones curados con bajo contenido en sal y texturas defectuosas. Cada lote se dividió de manera aleatoria en 4 grupos. Los grupos del lote 1 están formados por 24 jamones mientras que los grupos del lote 2 se componen de 26 jamones. Cada uno de estos grupos se saló un tiempo determinado: 4, 6, 8 y 11 días, tal y como indica la Tabla 1.

TABLA 1. Número de jamones salados a los diferentes tiempos (4, 6, 8 y 11 días) en cada lote.

	Número de jamones salados			
	4 días	6 días	8 días	11 días
LOTE 1	24	24	24	24
LOTE 2	26	26	26	26

Finalizado el salado, se eliminó la sal superficial con aire comprimido y los jamones pasaron a la fase de reposo donde las piezas continuaron en una cámara de refrigeración a $2\pm 1^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de 85%. La temperatura de esta etapa continuó siendo baja debido a la existencia de riesgos microbiológicos y bioquímicos (proteólisis). El tiempo de reposo fue de 103 días para los jamones del lote 1 y de 90 días para los del lote 2. Durante este tiempo, se produce la difusión de la sal absorbida en la superficie del jamón. Además, se reduce progresivamente el valor de la actividad de agua en el interior del jamón y por tanto se inhibe el desarrollo de microorganismos alterantes y se controla la actividad enzimática endógena (Albarracín, 2009).

Por último, se llevó a cabo la etapa de secado-maduración, donde las piezas se colocaron en una cámara de secado con convección forzada. En esta etapa, se aumentó la temperatura ($22\pm 2^{\circ}\text{C}$) y se disminuyó la humedad relativa (70%). Durante el secado-maduración, se produce una gran pérdida de agua y por tanto la actividad de agua disminuye hasta valores muy pequeños (0.92) que permiten que los jamones sean estables a temperatura ambiente. Además, se produce proteólisis, lipólisis y reacciones bioquímicas que aportan sabor y aroma al producto final. El tiempo de secado-

maduración puede variar entre 1 o 2 años (Grau et al., 2008). En este trabajo se monitorizaron los jamones únicamente hasta la primera fase del secado-maduración (77 días).

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ULTRASÓNICO PARA MEDIDAS EN JAMÓN CURADO

El sistema ultrasónico desarrollado se utilizó para monitorizar las primeras etapas del proceso de elaboración de jamón curado. A continuación se describen los principales parámetros de configuración del sistema para esta aplicación:

- Movimiento del brazo deslizante: distancia de bajada en el modo posicionamiento de 15 cm (250 mm/s) mientras que en el modo de fuerza la velocidad del brazo se redujo a 5 mm/s hasta que alcanzó el producto. La fuerza de empuje ejercida por el brazo en los jamones frescos y salados fue un 10% de la fuerza máxima (0.754 kg), que se aumentó al 30% (2.26 kg) tras la etapa de reposo debido al endurecimiento del jamón.
- Se realizaron 10 medidas distribuidas en la maza para cada jamón. En cada medida, se promediaron 10 señales ultrasónicas, realizándose el cálculo del tiempo de vuelo sobre el promedio de las mismas.
- No se utilizó material de acople en el jamón fresco y salado. Mientras que al finalizar el reposo y durante el secado fue necesario aplicar en la superficie del jamón una pequeña capa de aceite de oliva.
- Configuración del generador-receptor: se ajustó con una amplitud del pulso de excitación de 400 V, frecuencia de repetición de 100 kHz y ganancia de amplificación de 40 dB para producto fresco y salado y 60 dB tras el reposo y en secado.
- Configuración del osciloscopio: se empleó la velocidad de adquisición máxima (100 Mmuestras/s) con un total de 25000 puntos adquiridos. Se configuró la adquisición para capturar un total de 25000 puntos siendo un 10% de los mismos previos a la señal de disparo (trigger) (Figura 6).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Velocidad ultrasónica en la materia prima

En primer lugar, se midió la velocidad de los ultrasonidos en los jamones frescos. Esta medida es muy importante ya que permite caracterizar el producto, de manera que los cambios futuros pueden referirse a esta medida inicial mediante el cálculo de la variación de la velocidad ultrasónica (de Prados et al., 2015a).

En la Figura 7 se muestra la velocidad ultrasónica en función del peso del jamón, donde cada punto corresponde a la media de las 10 medidas de velocidad tomadas en la maza. Se puede observar que los valores de

velocidad presentan una distribución aleatoria en todo el rango de peso de los jamones, sin mostrar ninguna influencia de esta variable. Podría esperarse que los jamones de mayor tamaño correspondan con animales de mayor contenido graso. Teniendo en cuenta que a 4°C la grasa está en estado sólido y que los ultrasonidos se propagan más rápido en medio sólido que en medio líquido (Benedito et al., 2000), los jamones más pesados deberían proporcionar una velocidad ultrasónica mayor. Sin embargo, este comportamiento no fue observado, lo que podría deberse a la gran variabilidad de la composición de los jamones, ya que además de la grasa y el agua, influyen otros componentes como el tipo de matriz proteica y tejido conectivo.

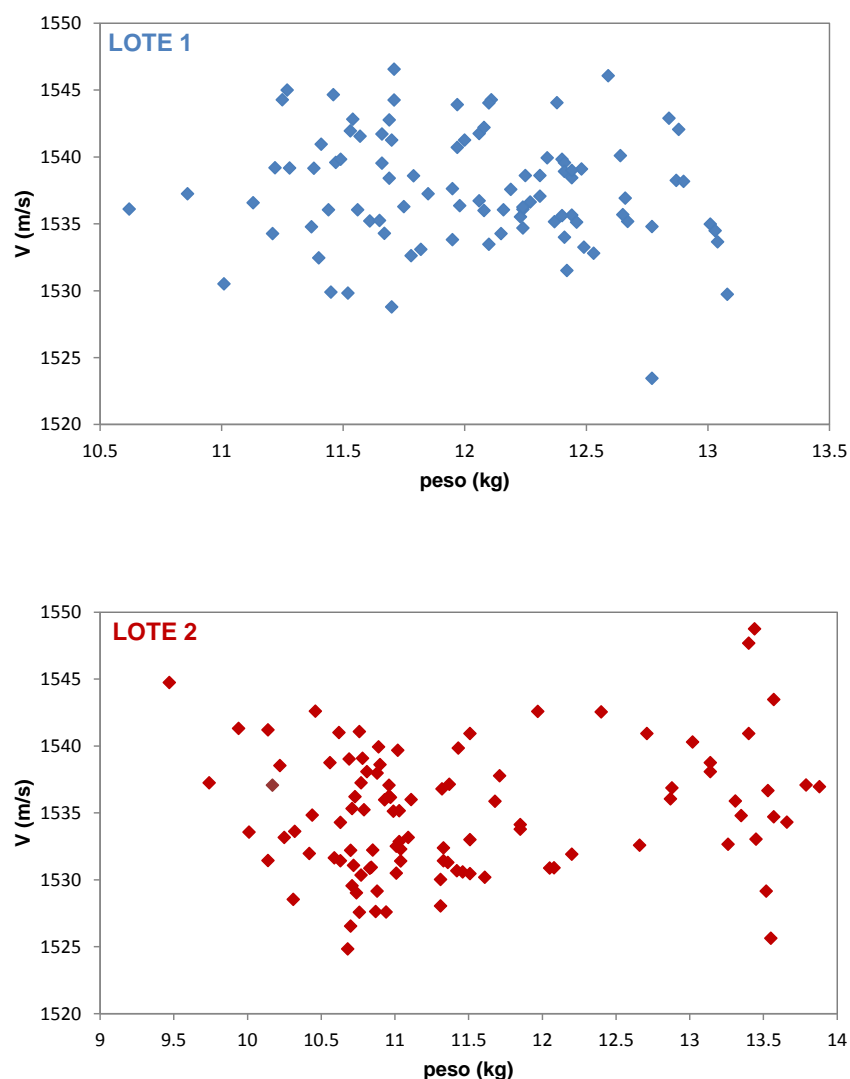


FIGURA 7. Velocidad ultrasónica media en función del peso de cada jamón fresco para los lotes 1 y 2.

Por otra parte, la medida de la velocidad inicial permite hacer una estimación del contenido graso del jamón. La determinación del contenido en

grasa en piezas cárnicas enteras como el jamón es complicada debido, entre otros, a la presencia de huesos, piel y tejido conectivo y a la existencia de distintos músculos tanto con un contenido como con una distribución en grasa intramuscular y subcutánea muy heterogéneos. Además, la raza y la alimentación del cerdo pueden modificar la fracción grasa y el perfil de humedad del jamón y por tanto verse afectada significativamente la velocidad de los ultrasonidos (Niñoles et al., 2008). McClements y Povey (1992) afirmaron que un aumento de temperatura disminuye la velocidad de los ultrasonidos cuando se propagan a través de grasa. Esto es debido a que un aumento en la temperatura implica la fusión de la grasa, pasando a estado líquido, estado en el cual los ultrasonidos se propagan a menor velocidad. Por ello, se puede afirmar que la influencia del contenido en grasa sobre la velocidad de los ultrasonidos en jamón es dependiente de la temperatura. Así, para poder asegurar que la grasa presente en el jamón se encontraba en estado sólido, y como ya se ha indicado, todos los jamones fueron medidos en condiciones de refrigeración (4°C). Para la predicción del contenido en grasa se utilizó el modelo predictivo obtenido por de Prados et al. (2015a) para estimar el contenido graso en jamones enteros frescos a partir de la velocidad ultrasónica. Este modelo lineal (ecuación 1) consta de una gran robustez puesto que fue obtenido a partir de jamones enteros con un contenido en grasa comprendido entre 8 y 40% (b.h.). Además, la bondad del ajuste alcanzó un R^2 igual a 0.89 y un RMSEC (Raíz Cuadrada Media del Error de Calibración) bajo, 2.90%.

$$X_{grasa} (\% \text{ b. h.}) = 0.54V - 821.99 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde X_{grasa} es el contenido graso (% b.h.) y V la velocidad ultrasónica (m/s).

Aplicando la ecuación 1 a las velocidades medias del producto fresco, se obtuvieron los valores del contenido en grasa en la maza de las piezas. Los resultados obtenidos fueron muy diversos, obteniendo porcentajes de grasa en base húmeda en un rango de 0.68-13.15% en el lote 1 y 1.43-14.35% en el lote 2. Así, la medida de la velocidad en los jamones frescos permitiría clasificar los jamones en distintos grupos en función del contenido en grasa, lo cual sería de gran utilidad para el control de calidad a nivel industrial puesto que el contenido en grasa afecta a la absorción de sal durante la etapa de salado, actuando como barrera para la penetración de la sal (Albarracín, 2009).

Influencia del salado en la velocidad ultrasónica

El principal objetivo del salado es la ganancia de sal, ya que la disminución del contenido en agua se produce en mayor medida en las siguientes etapas del procesado de jamón curado. Por ello, la medida de la velocidad de los ultrasonidos tras la etapa de salado está dirigida principalmente a proporcionar una buena estimación de la ganancia en sal de cada jamón (de Prados et al, 2015b).

Para evaluar la absorción de sal durante el salado de los jamones, se consideró conveniente evaluar la variación de velocidad ultrasónica (ΔV) entre la velocidad de los ultrasonidos después y antes del salado, tal y como demostraron de Prados et al. (2015b). La figura 8 muestra la influencia del tiempo de salado en la velocidad de los ultrasonidos.

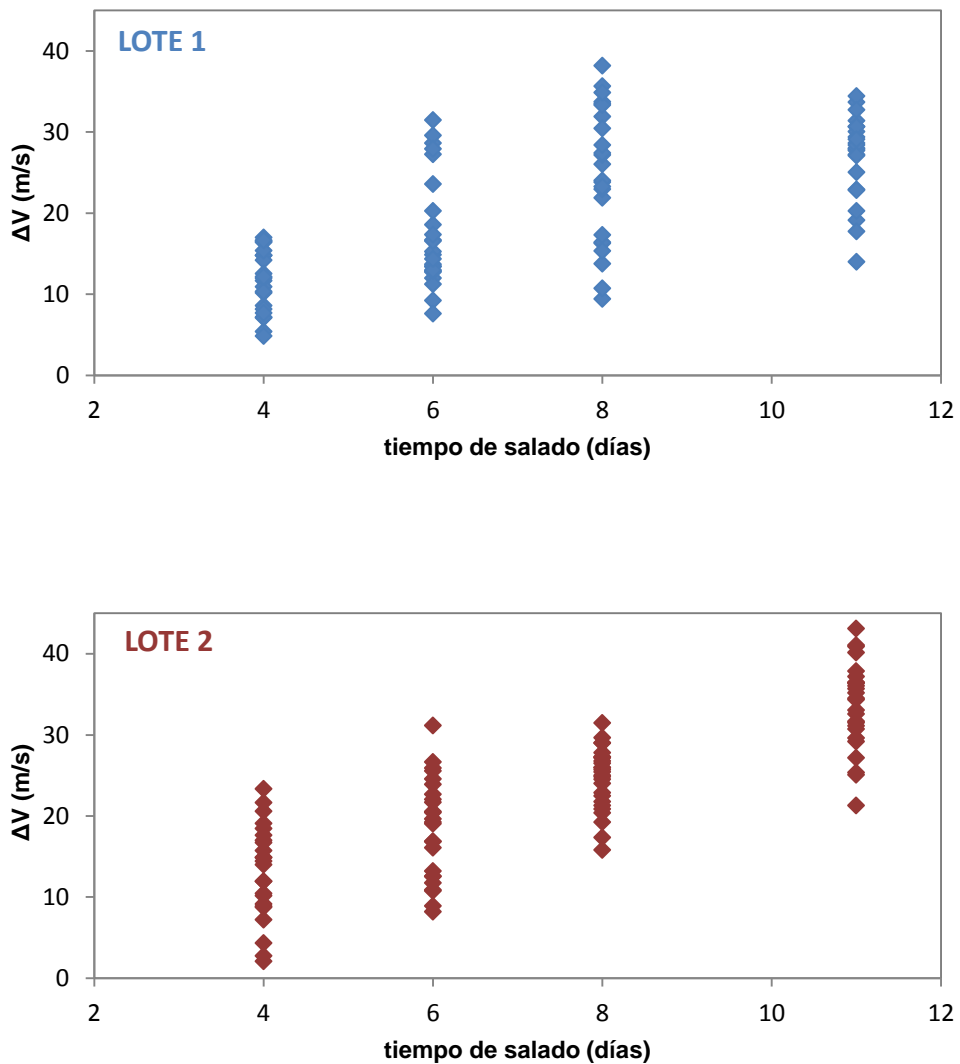


FIGURA 8. Variación de la velocidad ultrasónica en función del tiempo de salado (4, 6, 8 y 11 días) para el lote 1 y 2.

Como puede observarse, existe una gran variabilidad experimental en la variación de velocidad ultrasónica para un mismo tiempo de salado. Además, se observa que la velocidad ultrasónica aumentó durante el salado, puesto que la variación de velocidad resulta positiva en todos los casos, indistintamente del tiempo de salado. Esto es debido al incremento neto de sólidos en el jamón, atribuido a la ganancia de sal y a la pérdida de agua, ya que como se mencionó anteriormente, los ultrasonidos viajan más rápido en

medio sólido que en medio líquido. Este hecho fue demostrado por Kinsler et al. (1982), quienes encontraron que la velocidad de los ultrasonidos medida a cualquier temperatura aumenta con el aumento de la concentración de sal en una solución acuosa. Esto explica el hecho de que la velocidad de los ultrasonidos aumente cuando aumenta el contenido de sal en el jamón. Resultados similares se obtuvieron durante la maduración de diversos tipos de queso (Benedito et al., 2000), donde la velocidad ultrasónica aumentó debido a la disminución del contenido en agua y al aumento de sólidos. De esta forma, cuanto mayor fue el tiempo de salado, más tiempo estuvo el jamón en contacto con la sal y mayor fue la velocidad ultrasónica (Figura 9 y 10). Así, tras 4 días de salado, el incremento en la velocidad de los ultrasonidos fue 11.56 ± 3.83 y 13.17 ± 5.8 m/s para los lotes 1 y 2, respectivamente. En cambio, cuando el tiempo de salado fue de 11 días, la variación de la velocidad fue de 27.38 ± 5.62 m/s para el lote 1 y 33.62 ± 5.3 m/s para el lote 2. La gran variabilidad observada dentro de cada lote, para cada tiempo de salado, podría deberse a las diferencias tanto del contenido graso, como del tejido conectivo presente en cada jamón. A modo de ejemplo, tras seis días de salado, el incremento de la velocidad ultrasónica fue de 29 m/s para algunos jamones mientras que en otros tan sólo aumentó 8 m/s.

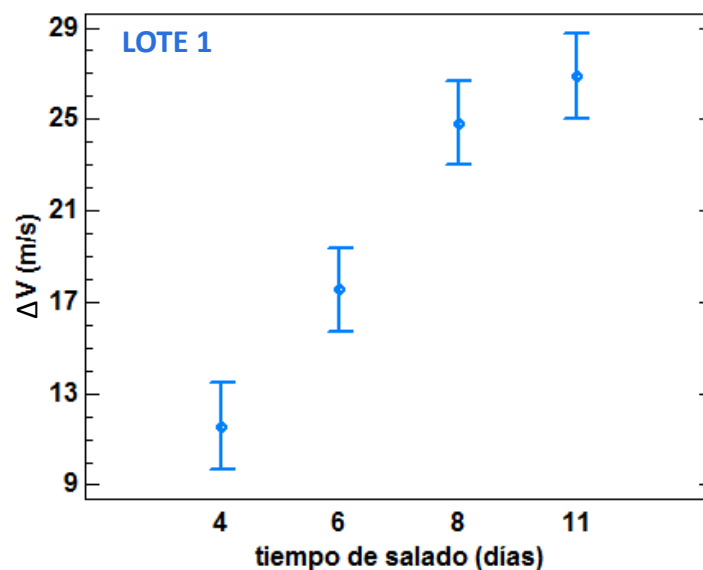


FIGURA 9. Valores medios e intervalos LSD (95%) del incremento de velocidad ultrasónica durante el salado de los jamones del lote 1.

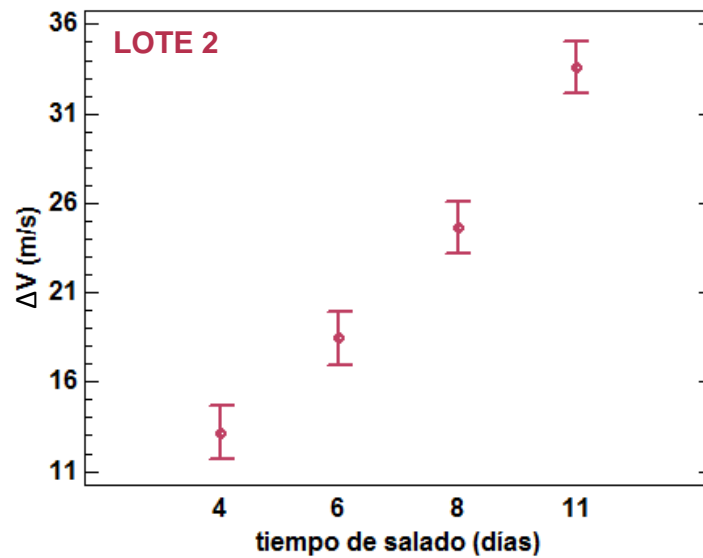


FIGURA 10. Valores medios e intervalos LSD (95%) del incremento de velocidad ultrasónica durante el salado de los jamones del lote 2.

De Prados et al. (2015b) estimaron que un aumento en la concentración de sal del 1% (b.h.) en carne de cerdo salada en salmuera provocaba un aumento en la velocidad ultrasónica de 13 m/s. Así, empleando la ecuación 2 obtenida por dichos autores se estimó el incremento del contenido en sal tras la etapa de salado en la maza del jamón (tabla 2).

$$\Delta X_s = \frac{\Delta V - 8.67}{13.43} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde ΔX_s es el incremento del contenido en sal (%) y ΔV el aumento de la velocidad ultrasónica (m/s) durante la etapa de salado.

TABLA 2. Ganancia de sal (ΔX_s , % b.h.) tras el salado de los jamones de los lotes 1 y 2, estimada mediante ultrasonidos.

	LOTE 1	LOTE 2
ΔX_s (4 días)	0.374	0.471
ΔX_s (6 días)	0.694	0.762
ΔX_s (8 días)	1.203	1.190
ΔX_s (11 días)	1.358	1.858

Tal y como ilustra la figura 11, el incremento del contenido en sal con el tiempo fue lineal para el periodo analizado.

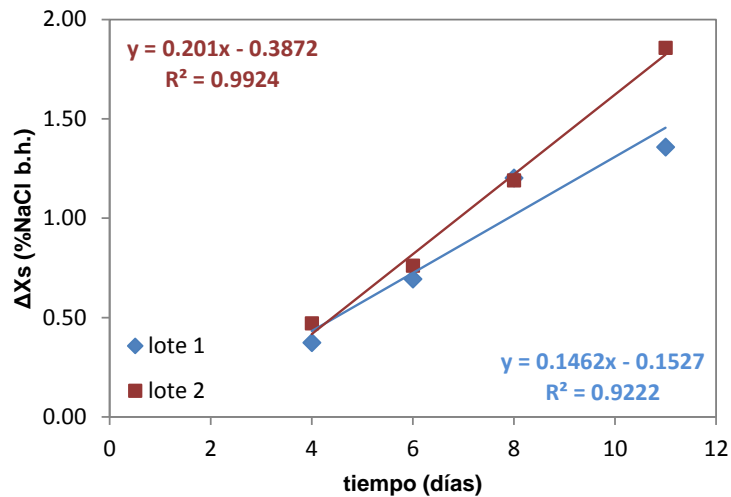


FIGURA 11. Influencia del tiempo de salado sobre la absorción de sal.

Evolución de la velocidad ultrasónica durante las fases de reposo y secado-maduración

Las Figuras 12 y 13 muestran la variación de velocidad al final de la etapa de salado y de reposo y durante la etapa de secado-maduración respecto a la velocidad ultrasónica de cada jamón fresco. Cada punto de la gráfica se corresponde con el incremento de velocidad medio de los jamones salados 4, 6, 8 y 11 días. En la etapa de reposo, se observa un incremento de la velocidad de los ultrasonidos en ambos lotes, sin embargo, en el lote 2, el incremento fue ligeramente inferior. El aumento de la velocidad en esta etapa podría deberse a la distribución de sal por todo el jamón lo que provoca un endurecimiento en su interior debido a la desnaturalización proteica. Además se produce una pequeña pérdida de agua.

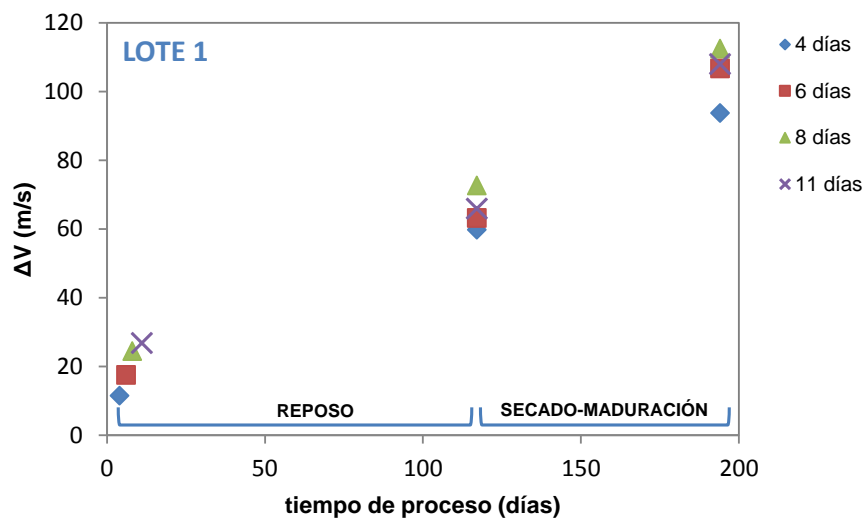


FIGURA 12. Evolución de la velocidad ultrasónica durante el proceso de reposo y secado-maduración del lote 1.

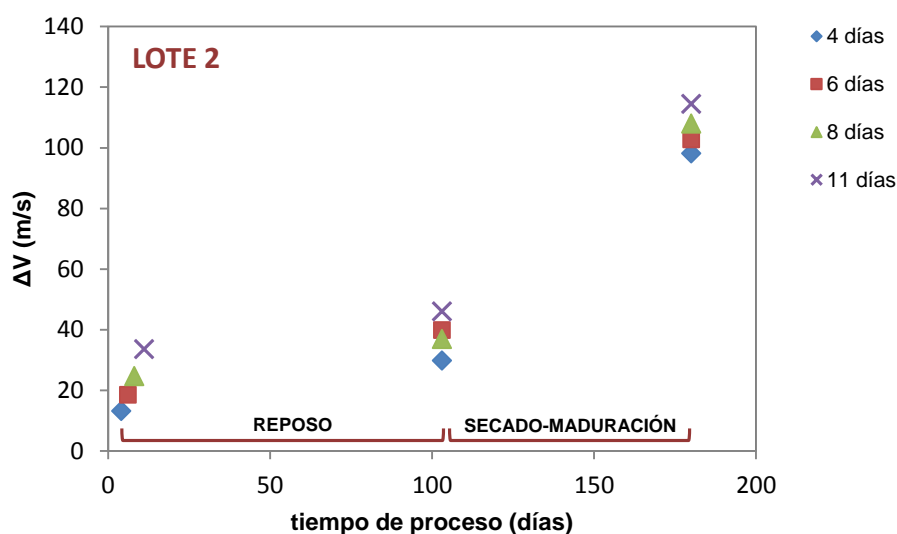


FIGURA 13. Evolución de la velocidad ultrasónica durante el proceso de reposo y secado-maduración del lote 2.

En cuanto a la etapa de secado, durante los 77 días de secado que llevan los jamones, se puede observar un aumento muy marcado en la variación de velocidad ultrasónica. Esto es debido a la pérdida de agua que sufre el jamón durante el secado-maduración, aumentando así su contenido en sólidos. Además, es la única medida ultrasónica realizada a 22°C. Este cambio llevado a cabo en las condiciones de la cámara (22°C – 60%HR) durante la etapa de secado conlleva un aumento de la temperatura del agua todavía presente en el interior del jamón, por donde los ultrasonidos se propagan más rápido a mayor temperatura (McClements, 2004). Por otra parte, cabe destacar que los jamones salados 4 días presentan los menores incrementos en la velocidad ultrasónica en todo el proceso abarcado por las medidas ultrasónicas, diferenciándose de los jamones salados 6, 8 y 11 días. Esto podría explicarse por la pequeña cantidad de sal absorbida, que implica un menor cambio estructural de los jamones y por tanto continúan blandos, pudiendo incluso ser jamones que presentan defectos de textura a los 77 días de secado. De forma similar, Corona et al. (2013) observaron en jamones loncheados, que cuanto más blandas son las lonchas, más lento se propagan los ultrasonidos.

Por último, cabe señalar que no existe literatura sobre monitorización con ultrasonidos del proceso de elaboración de jamón curado y que todos los resultados en este trabajo deben confirmarse cuando finalice el proceso de elaboración y se analice la composición, textura y estructura de los jamones.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden obtener de este trabajo se incluyen a continuación:

- La medida de la velocidad ultrasónica en jamones frescos puede ser útil para la caracterización y posterior clasificación de los jamones en función de su composición.
- La velocidad de los ultrasonidos se vio afectada por el tiempo de salado. Así, los jamones salados más tiempo presentaron una velocidad ultrasónica mayor.
- En la etapa de secado-maduración, la velocidad ultrasónica siguió aumentando como consecuencia de la pérdida de agua y el incremento de la dureza.
- El sistema automático desarrollado podría utilizarse a nivel industrial para monitorizar el proceso de elaboración de jamón curado de forma no destructiva, rápida y económica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al INIA, MINECO y el programa FEDER la financiación a través del proyecto: RTA2013-00030-C03-02.

REFERENCIAS

Albarracín, W. (2009). Salado y descongelado simultáneo en salmuera para la obtención de jamón curado de cerdo de raza ibérica. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D., Youssef, M.M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: a review. *Food Research International*, 48: 410-427.

Barat, J. M., Grau, R., Pagán-Moreno, M. J., Fito, P. (2004). Replacement of pile salting by simultaneous brine thawing-salting in Spanish cured ham manufacturing. *Meat Science*, 66: 603-608.

Benedito, J., Cárcel, J., Gisbert, M., Mulet, A. (2001a). Quality control of cheese maturation and defects using ultrasonics. *Journal Food Engineering and Physical Properties*, 1: 100-104.

Benedito, J., Cárcel, J. A., Rosselló, C., Mulet, A. (2001b). Composition assessment of raw meat mixtures using ultrasonics. *Meat Science*, 57: 365-370.

Benedito, J., Cárcel, J., Clemente, G., Mulet, A. (2000). Cheese maturity assessment using ultrasonics. *Journal of Dairy Science*, 83: 248-254.

Buckin, V., O'Driscoll, B., Smyth, C. (2003). Ultrasonic spectroscopy for material analysis: Recent advances. *Spectroscopy Europe*, 15: 20-25.

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: 389-395.

de Prados, M., Fulladosa, E., Gou, P.; Muñoz, I., García-Pérez, J.V., Benedito, J. (2015a). Non-destructive determination of fat content in green hams using ultrasound and X-rays. *Meat Science*, 104: 37-43.

de Prados, M., García-Pérez, J.V., Benedito, J. (2015b). Non-destructive salt content prediction in brined pork meat using ultrasound technology. *Journal of Food Engineering*, 154: 39-48.

Fulladosa, E., Muñoz, I., Serra, X., Arnau, J., Gou, P. (2015). X-ray absorptiometry for non-destructive monitoring of the salt uptake in bone-in raw hams during salting. *Food Control*, 47: 37-42.

Grau, R., Albarracín, W., Toldrá, F., Antequera, T., Barat. J.M. (2008). Study of salting and post-salting stages of fresh and thawed Iberian hams. *Meat Science*, 79: 677-682.

Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppers, A.B., Sanders, J.V. (1982). *Fundamentals of Acoustics*, third edition. John Wiley and Sons, New York, U.S.A.

Liu, D., Qu, J., Sun, D-W., Pu, H., Zeng, X.-A. (2013). Non-destructive prediction of salt contents and water activity of porcine meat slices by hyperspectral imaging in a salting process. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20: 316-323.

Llull, P., Simal, S., Femenia, A., Benedito, J., Rosselló, C. (2002). The use of ultrasound velocity measurement to evaluate the textural properties of sobrassada from Mallorca. *Journal of Food Engineering*, 52: 323-330.

McClements, D. J. (2004). *Food emulsions: Principles, practices, and techniques*. CRC Press

McClements, D.J., Povey, M.J.. (1992). Ultrasonic analysis of edible fats and oils. *Ultrasonics*, 30: 383-388.

Morales, R., Guerrero, L., Aguiar, A. P. S., Guàrdia, M. D., Gou, P. (2013). Factors affecting dry-cured ham consumer acceptability. *Meat Science*, 95: 652-657.

Mulet, A., Benedito, J., Bon, J., Sanjuan, N. (1999). Low intensity ultrasonics in food technology. *Food Science Technology International*, 5: 285-297.

Niñoles, L., Sanjuan, N., Ventanas, S., Benedito, J. (2008). Ultrasonic and sensory characterization of dry-cured ham fat from Iberian pigs with different genetics and feeding backgrounds. *Meat Science*, 80: 896-902.

Resa, P., Elvira, L., Montero de Espinosa, F. (2004). Concentration control in alcoholic fermentation processes from ultrasonic velocity measurements. *Food Research International*, 37: 587-594.