

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



Sistema de control “on-line” del proceso de salado de productos cárnicos

**TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS
ALIMENTOS**

ALUMNO: KEVIN DÍAZ PICÓ

TUTOR: JOSÉ JAVIER BENEDITO FORT

DIRECTORA EXPERIMENTAL: MARTA DE PRADOS PEDRAZA

CURSO 2013-2014

VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2014





UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA Y DEL MEDIO
NATURAL

Ficha resumen del Trabajo Fin de
Carrera

Datos del trabajo de fin de grado (TFG)

Título del TFG: Sistema de control "on-line" del proceso de salado de productos cárnicos

Autor: Kevin Díaz Picó

Tutor Académico: José Javier Benedito Fort

Cotutora experimental: Marta de Prados Pedraza

Lugar y fecha: Valencia, Septiembre de 2014

Resumen

El contenido en sal de los productos cárnicos curados alcanzado durante la etapa de salado es uno de los parámetros de calidad más importantes de los mismos, siendo tradicionalmente determinado mediante técnicas destructivas. Por otra parte, los ultrasonidos de baja intensidad o señal se presentan como una técnica no-destructiva, rápida, fiable, económica y con capacidad para ser empleada de manera "on-line" en los sistemas de producción. Así pues, el objetivo principal del presente trabajo fue determinar la viabilidad de los ultrasonidos de señal en modo pulso-eco para monitorizar de manera no-destructiva el proceso de salado en seco de carne de cerdo.

Para ello, se midió automáticamente el tiempo de vuelo cada 5 minutos durante el salado de músculos *Longissimus dorsi* (LD) procedentes de cerdo a diferentes tiempos de salado (6, 12, 48, 72 horas), realizándose dos repeticiones por cada tiempo. Al finalizar el proceso de salado se determinó el contenido en sal y humedad de las zonas de medida. Por último se establecieron las relaciones entre las variables composicionales y la variación del tiempo de vuelo.

El incremento en sólidos en las muestras (ganancia de sal y pérdida de agua) conllevó una disminución progresiva del tiempo de vuelo durante el salado, estableciéndose relaciones significativas ($p < 0.05$) entre la disminución del tiempo de vuelo y el contenido en sal y agua. Se plantearon dos modelos matemáticos simples. El modelo 1 se planteó a partir de un parámetro ultrasónico ya estudiado con anterioridad, como es la velocidad ultrasónica, que está relacionada con el tiempo de vuelo. Dicho modelo fue capaz de predecir razonablemente ($R^2=0.79$; $RMSE=0.59$) la ganancia de sal de las muestras durante el salado. El modelo 2, en cambio, se desarrolló mediante un ajuste polinómico a partir del tiempo de vuelo inicial y final y su capacidad de predicción ($R^2=0.86$; $RMSE=0.48$) fue ligeramente superior a la del modelo 1. Así pues, los ultrasonidos en modo pulso-eco se presentan como una técnica eficaz para la monitorización del proceso de salado de carne a nivel industrial.

Palabras clave

Productos cárnicos, salado, ultrasonidos, control de calidad "on-line", análisis no-destructivo.

Abstract

The content of salt reached during the salting process of cured meat products is one of the most important quality parameters of these products, being traditionally determined by destructive techniques. On the other hand, low intensity ultrasounds are presented as a of quick, reliable and economical nondestructive technique which can be used "on-line" in production systems. Thus, the main objective of the present work was to determine the viability of the ultrasonic pulse-echo signal mode to non-destructively monitor the pork brining.

For that purpose, the time of flight was measured automatically every 5 minutes during the salting process of pork *Longissimus dorsi* (LD) muscles at different times of salting (6, 12, 48, 72 hours). Two repetitions being carried out for each salting time. When the salting process finished, the content of salt and moisture were determined in the measuring area. Finally the relationships between the compositional variables and the variation of the time of flight were established.

The solids increase in the samples (gain of salt and water loss) brought about a progressive decrease of the time of flight during the salting process. Significant relationships ($p < 0.05$) between the decrease of the time of flight and the salt and water content were established. Two simple mathematical models were obtained. The model 1 was formulated from an ultrasonic parameter already studied previously, the ultrasonic velocity, which is related to the time of flight. The model was able to predict reasonably ($R^2=0.79$; $RMSE=0.59$) the gain of salt of the samples during the salting process. On the other hand, the model 2 was developed using a polynomial fit from the initial and final time of flight and its prediction capacity ($R^2=0.86$; $RMSE=0.48$) was slightly better than for model 1.

Keywords

Meat products, salting process, ultrasounds, on-line quality control, non-destructive analysis.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi reconocimiento y agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible la realización de este trabajo:

En primer lugar, a D. José Javier Benedito Fort, tutor de este proyecto, por brindarme la oportunidad de realizar el presente trabajo y también por sus buenos consejos, ayuda y dedicación prestada en todo momento.

A todos los integrantes del grupo Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), especialmente a Marta de Prados, a quien me gustaría mostrar mi sincero agradecimiento por su atención constante y por haberme guiado como directora experimental en las tareas de laboratorio.

Por último a quienes me han enseñado los valores del esfuerzo y la constancia, mi familia.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. IMPORTANCIA DE LOS PRODUCTOS CÁRNICOS CRUDO-CURADOS.....	1
1.2. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOMO CURADO.....	2
1.3. EL SALADO DE PRODUCTOS CÁRNICOS CRUDO-CURADOS.....	3
1.3.1. PROCESO DE SALADO. GENERALIDADES.....	3
1.3.2. TIPOS DE SALADO.....	4
1.4. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN SAL EN PRODUCTOS CÁRNICOS.....	5
1.4.1. MÉTODOS DESTRUCTIVOS.....	6
1.4.2. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.....	6
1.5. ULTRASONIDOS.....	7
1.5.1. GENERALIDADES.....	7
1.5.2. ULTRASONIDOS DE SEÑAL.....	7
1.5.3. ULTRASONIDOS DE SEÑAL EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1. MATERIA PRIMA.....	12
3.2. EXPERIENCIAS DE SALADO EN SECO.....	12
3.3. CÁLCULO DEL TIEMPO DE VUELO.....	14
3.4. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS COMPOSICIONAL.....	15
3.5. ANÁLISIS QUÍMICOS.....	15
3.5.1. pH.....	15
3.5.2. DETERMINACIÓN DE GRASA (X_g).....	15
3.5.3. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CLORUROS (X_s).....	16
3.5.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN HUMEDAD (X_w).....	16
3.6. MODELOS DE REGRESIÓN. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	16
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
4.1. PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE ULTRASONIDOS.....	17
4.2. MONITORIZACIÓN DEL SALADO MEDIANTE ULTRASONIDOS.....	20

4.2.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LAS MUESTRAS CÁRNICAS	20
4.2.2. EVOLUCIÓN DEL TIEMPO DE VUELO DURANTE EL SALADO.....	21
4.2.3. INFLUENCIA DEL CONTENIDO EN SAL y AGUA EN LA VARIACIÓN DEL TIEMPO DE VUELO.....	25
4.3. PREDICCIÓN DEL CONTENIDO EN SAL MEDIANTE ULTRASONIDOS.....	30
4.3.1. DESARROLLO DE MODELOS	30
4.3.1.1. MODELO 1	30
4.3.1.2. MODELO 2	31
5. CONCLUSIONES.....	33
6. BIBLIOGRAFÍA.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama del proceso de elaboración de lomo curado	3
Figura 1.2. Señal obtenida a partir del modo pulso-eco.....	9
Figura 3.1. Músculo <i>Longissimus dorsi</i> (LD).....	12
Figura 3.2. Esquema del sistema de medida del Tv.....	13
Figura 3.3. Procedimiento para el cálculo del Tv	14
Figura 3.4. Proceso de obtención de las muestras saladas cilíndricas.....	15
Figura 4.1. Señales obtenidas a varios tiempos de salado (0, 24 y 48 horas) (transductor A) .	18
Figura 4.2. Señales obtenidas a varios tiempos de salado (0, 24 y 48 horas) (transductor B) .	18
Figura 4.3. Evolución del t_v durante el periodo de salado. Transductores A y B	19
Figura 4.4. Evolución del t_v a diferentes tiempos de salado (6, 12, 24 y 72 horas)	23
Figura 4.5. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en sal (ΔX_s)	26
Figura 4.6. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en agua (ΔX_w)	27
Figura 4.7. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en sal (ΔX_s) para los transductores de tipo A y B	28
Figura 4.8. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en agua (ΔX_w) para los transductores A y B.....	29
Figura 4.9. Ganancia de sal experimental ($\Delta X_s \text{ exp}$) frente a la calculada ($\Delta X_s \text{ cal}$) a partir del modelo 1 para todas las muestras	31
Figura 4.10. Ganancia de sal experimental ($\Delta X_s \text{ exp}$) frente a la calculada ($\Delta X_s \text{ cal}$) a partir del modelo 2 para todas las muestras	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Productos cárnicos elaborados. Producción en España (ANICE, 2014)	1
Tabla 4.1. Valores composicionales y parámetros ultrasónicos de las muestras preliminares	20
Tabla 4.2. Valores iniciales medios de pH, contenido en agua (X_w), sal (X_s), grasa intramuscular (X_g), peso y espesor del músculo LD	21
Tabla 4.3. Variación del contenido en sal y espesor para las zonas de los transductores 3 y 4 de la prueba 2 de 48 horas de salado	22
Tabla 4.4. t_v inicial respecto al espesor de la muestra (Prueba 2 de 72 horas de salado)	22
Tabla 4.5. Contenido en sal (X_s) y agua (X_w) después del salado y variación del contenido en sal (ΔX_s), agua (ΔX_w) y tiempo de vuelo (Δt_v) para todos los tiempos ensayados	24
Tabla 4.6. Contenido en grasa (X_g) y variación del contenido en sal (ΔX_s) para las pruebas 1 y 2 de 72 horas de salado	25

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. IMPORTANCIA DE LOS PRODUCTOS CÁRNICOS CRUDO-CURADOS

En Europa, la industria de alimentación y bebidas es un sector que ocupa el primer puesto dentro de la industria manufacturera, representando el 14.6% del volumen total de negocios (Food Drink Europa, 2013). A nivel estatal, es también una de las ramas que más contribuye económicamente al sector industrial representando casi el 18% del total de facturación anual, con un valor aproximado de 110.000 millones de euros (INE, 2013).

Muchos subsectores contribuyen a consolidar la industria agroalimentaria como una de las más importantes, entre ellos la industria cárnica, que representa el 22% del total de ventas netas anuales (MAGRAMA, 2013) y exporta un total de 1.57 millones de toneladas de productos de todo tipo por valor de 4.189 millones de euros a mercados de todo el mundo (Asociación Nacional de Industrias de la Carne de España (ANICE), 2014).

La industria cárnica se puede estructurar de diferentes maneras. Una de ellas es por el tipo de animal del que procede la carne, siendo la de porcino la más relevante en cuanto a producción. A nivel mundial, China se consolida como el número uno englobando el 50% de la producción y Europa se sitúa en segundo lugar como productor de carne de cerdo (21%) (Eurocarne, 2014). Dentro de la Unión Europea, España es el segundo país europeo en producción de carne de cerdo, representando, con 3.420.000 toneladas, el 16% del total (ANICE, 2014).

En cuanto a la producción de elaborados cárnicos, España se sitúa en cuarto lugar en la U.E., por detrás de Alemania, Italia y Francia (ANICE, 2014). La producción española de elaborados cárnicos en 2012 se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Productos cárnicos elaborados. Producción en España (ANICE, 2014).

Producto	Producción 2012 (tm)	% del total
Jamón y paleta curados	247.500	19.0
Embutidos curados	18.300	14.1
Jamón y paleta cocidos	17.600	13.5
Otros tratados por el calor	421.000	32.4
Productos adobados y frescos	187.200	14.4
Platos preparados	86.300	6.6

Dada la magnitud de la producción de productos elaborados cárnicos y en particular de los productos cárnicos crudo-curados en España (Tabla 1.1.), todo esfuerzo empleado para mejorar tanto el proceso como la calidad final de los mismos, será relevante para este sector.

1.2. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOMO CURADO

Los productos cárnicos crudo-curados son aquellos productos de origen animal a los que se le han adicionado sales de curado, aditivos y/o especias y opcionalmente han sufrido una etapa de fermentación y/o ahumado para finalizar con una etapa de secado-maduración a temperaturas no superiores a 37°C (Pérez, 2006). El principio de conservación es pues la depresión de la actividad de agua, lo cual permite su almacenamiento a temperatura ambiente, evitando así la refrigeración (Pérez-Álvarez et al., 1997). Además, estos productos se clasifican según si presentan integridad anatómica (lomo, jamón...) o no (fuet, salchichón, chorizo...) (Pérez, 2006).

Un tipo de producto cárnico crudo-curado es el lomo curado o embuchado, que según la orden de 27 de febrero de 1980 (B.O.E. 21/3/80), se define como: << *producto elaborado con el músculo ileoespinal del cerdo (prácticamente libre de grasa externa), aponeurosis y tendones, salado, adobado y embutido en tripas naturales o artificiales permeables y que ha sufrido un proceso de maduración apropiado*>>.

El proceso de elaboración del lomo embuchado sigue un diagrama de flujo (Figura 1.1) que empieza con la recepción de la materia prima y la posterior eliminación de la grasa subcutánea. La siguiente etapa es el salado, donde las piezas se frotan con sales de nitrificación (nitratos y nitritos) mediante masaje en un bombo durante 20 minutos. Posteriormente se apilan en un mismo contenedor rodeados de sal común y se llevan a refrigeración (4°C) durante 2 días para estabilizar el producto. A continuación se adoban con una mezcla de especias, aditivos y azúcar y se maceran durante 4-6 días a 4°C. El paso siguiente es el embutido en tripas naturales o artificiales de un calibre adecuado al grosor del lomo. Los lomos embutidos se someten a un ligero estufaje (opcional) a una temperatura de 20-22°C con una HR del 95% durante 2-3 días. Si se obvia este paso, se mantienen con una HR del 90-95 %, durante los primeros 4-5 días a 10°C y después en el secadero se va reduciendo progresivamente la humedad. Por último la curación se efectúa a una temperatura de 10-12°C y 75-80% de HR durante 25-45 días según el tipo de tripa utilizado y el tamaño del lomo (Armenteros, 2010).

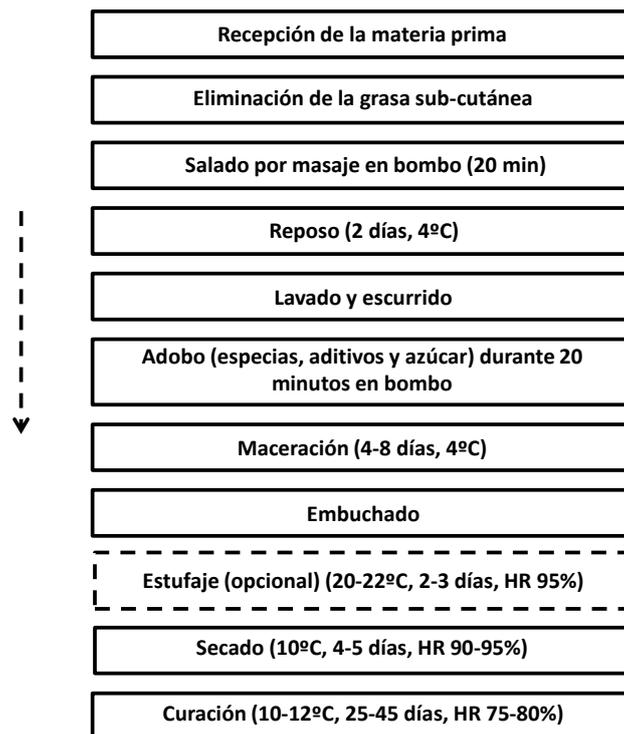


Figura 1.1. Diagrama del proceso de elaboración de lomo curado.

1.3. EL SALADO DE PRODUCTOS CÁRNICOS CRUDO-CURADOS

1.3.1. PROCESO DE SALADO. GENERALIDADES

El salado es una técnica utilizada desde la antigüedad para conservar los alimentos, siendo la sal uno de los aditivos más usados en la industria alimentaria debido a su abundancia, su bajo coste y sus diferentes propiedades (Albarracín et al., 2011). Durante el proceso de salado se produce una transferencia de materia, donde el agua sale hacia el exterior y la sal difunde hacia el interior del alimento debido a mecanismos osmóticos y diferencias de concentración entre el medio exterior (sal) y la carne (Barat et al., 2003). La difusión de la sal en productos sólidos ocurre a través de los poros en fase líquida y puede ser explicado por la ley de Fick (Martínez et al., 2011).

Este proceso presenta una serie de efectos sobre los alimentos como realzar y modificar su sabor debido a la desnaturalización y solubilización de las proteínas (Silva et al., 2003) y aumentar la capacidad de retención de agua (CRA) debido a que la estructura de las proteínas se hace más abierta incrementándose el poder de retención de agua (Lawrence et al., 2003). Además, la sal común (NaCl) reduce la actividad de agua (a_w) ralentizando o incluso inhibiendo el crecimiento de los microorganismos (Albarracín et al., 2011). También es capaz influir sobre las diferentes reacciones bioquímicas creando el flavor característico de los productos cárnicos crudo-curados (Bello, 2008). Por otra parte, la sal influye sobre fenómenos

tales como la lipólisis y la oxidación de los lípidos, que pueden generar el enranciamiento de las grasas (Aristoy et al., 2009).

Además de la sal común (NaCl) son adicionados otro tipo de compuestos como los nitratos (NO_3^-) y los nitritos (NO_2^-). A la mezcla de todas ellas se les denomina sales curantes o nitrificantes y sus efectos sobre la carne son la estabilización del color del producto final y la estabilización microbiana mediante la inhibición del crecimiento microbiano, especialmente del patógeno *Clostridium botulinum* (Niños, 2007a). Sin embargo, el uso de estas sales también presenta inconvenientes, siendo el principal problema la formación de compuestos cancerígenos como las N-nitrosaminas, generadas a partir de la reacción de los nitritos con las aminas secundarias (Honikel, 2008).

1.3.2. TIPOS DE SALADO

En la actualidad, los tipos de salado más frecuentes en la industria cárnica son el salado en seco, en salmuera, por inyección o por una combinación de estos métodos (Gómez, 2012). A continuación, se explica brevemente cada uno de ellos.

El **salado en seco** es uno de los métodos de salado más empleado en la industria cárnica debido a su sencillez. Se trata de alternar capas de producto cárnico y de sal humedecida durante 0.65-2 días/kg de carne a una temperatura entre 3-4°C y 90-95% de humedad relativa (Armenteros, 2010). De esta manera, mediante el contacto entre el agua de constitución de la carne y la sal se crea una solución sobresaturada de cloruro sódico, que permite la difusión de la sal hacia el interior de la masa muscular (Pérez, 2006). Para ello, se utiliza sal gruesa ya que se disuelve más lentamente que la fina y se logra que penetre más paulatinamente, evitándose un salado demasiado rápido, que provocaría un incremento de la presión osmótica favoreciendo la salida de los jugos musculares (Bello, 2008). Este método presenta algunas desventajas, que se deben fundamentalmente a la heterogeneidad en la penetración de sal y la posible oxidación del producto, debido al contacto directo con la sal y el aire (Pérez, 2006).

Por otro lado, el **salado en salmuera**, denominado comúnmente como salado por vía húmeda, se basa en la inmersión de la pieza cárnica en una salmuera a temperaturas de refrigeración (2-5°C) (Gisbert, 2001). El tiempo en el cual dicha pieza está inmersa en la salmuera depende del peso y de la relación existente entre el tejido muscular y el conjuntivo (a mayor tejido conjuntivo, mayor tiempo de salado) (Pérez, 2006). Además, podemos controlar el tiempo de salado mediante la concentración de la salmuera. La ventaja de este tipo de salado es la rapidez del salado al ser más favorable a la entrada de sal en el producto (Barat et al., 2003). Incluso se ha conseguido aumentar la eficacia del proceso, reduciendo aún más el

tiempo de salado aplicando vacío (Chiralt et al., 2001; Grau, 2002) y campos eléctricos pulsantes como pre-tratamiento (McDonell, 2014). Por el contrario, la principal desventaja es la posible contaminación microbiológica de la salmuera y que la carne puede adquirir un contenido de sal excesivo, lo que conlleva un mayor riesgo de quemaduras en la superficie del producto debidas a la elevada concentración de sal (Gómez, 2012).

Por último encontramos el **salado por inyección**, donde la salmuera es inyectada directamente a la pieza cárnica por medio de unas agujas, consiguiéndose un salado rápido y uniforme (Albarracín et al., 2011). La sal se difunde a través de la carne hasta el resto del tejido desde el punto de inyección debido a las fuerzas osmóticas (Gómez, 2012). El inconveniente de esta técnica es la posible contaminación cruzada a través de las agujas puesto que estas trabajan en continuo penetrando en las diferentes muestras. No obstante, esta es una técnica empleada en productos cárnicos a los que posteriormente se les aplica un tratamiento térmico, como el jamón cocido (Mora, 2010).

1.4. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN SAL EN PRODUCTOS CÁRNICOS

Tradicionalmente, la determinación del contenido en sal de productos cárnicos se lleva a cabo mediante técnicas que generalmente son costosas y fuera del alcance de pequeños fabricantes y minoristas. Además, se trata de técnicas destructivas que se realizan sobre el producto final, lo que implica la destrucción de la muestra al final del proceso, impidiendo la monitorización del proceso de salado. Además, estas técnicas requieren tiempos largos de análisis y mayoritariamente se hace uso de productos químicos contaminantes. Estos son algunos de los motivos que evidencian la necesidad de buscar nuevas técnicas de carácter no destructivo que permitan predecir el contenido en sal de forma rápida y fiable, y que además realicen mediciones durante el salado y al finalizar dicha etapa, con lo que se conseguiría monitorizar el proceso de salado de una manera "*on-line*". Su aplicación sería de gran importancia en productos cárnicos crudo-curados, concretamente en jamón y lomo curados, donde el contenido en sal final es uno de los parámetros clave para cumplir con los requisitos sanitarios y de calidad.

1.4.1. MÉTODOS DESTRUCTIVOS

Los métodos destructivos para medir el contenido en sal son los métodos químicos y los sensoriales (Ventanas, 2001). Los métodos destructivos más utilizados para determinar el contenido en sal de piezas cárnicas se basan en valoraciones volumétricas, como los métodos de Mohr y Volhard. Ambos métodos requieren la obtención de un extracto de la muestra, resultando un proceso laborioso y que precisa la destrucción de la misma. Además existen otros métodos destructivos como la medida de la conductividad eléctrica y los métodos electroquímicos.

1.4.2. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

El avance tecnológico en la industria alimentaria requiere cada vez más de la implementación de nuevos y mejores instrumentos de medida, es decir, sistemas de control de calidad no invasivos, precisos, rápidos, de bajo coste y que a su vez permitan conocer las propiedades físicas de manera "*on-line*", traducándose en un aumento de la calidad final del producto y un control más amplio sobre el mismo. Por ello, en la actualidad se han estudiado diferentes técnicas de carácter no destructivo para la medida del contenido en sal. Éstas son de tipo físico mayoritariamente, en concreto relacionadas con el espectro electromagnético o con medidas mecánicas. A continuación se detallan las más relevantes.

La **CT (Computed Tomography)** es una técnica de imagen no destructiva, capaz de visualizar las estructuras de bajo contraste en una muestra enviando un haz de rayos X a través de la misma (Kalender, 2005). Se basa en las diferencias de atenuación de los rayos X en diferentes tejidos. Dicha atenuación, que es la disipación de los rayos X debidos a la absorción y dispersión, depende de la densidad del tejido y el grosor de la muestra (Seeram, 2001). Así pues, como la adición de NaCl a la carne aumenta notablemente la densidad de esta, esto influirá sobre la atenuación de rayos X. En el estudio de Sørheim y Berg (1987) se demuestra con éxito la viabilidad del uso de esta tecnología para el análisis cuantitativo de NaCl en el jamón y el tocino. También fue utilizada por Frøystein et al. (1989) para examinar la distribución de sal en jamón curado. Posteriormente, Vestergaard et al. (2004) consiguieron cuantificar la concentración de NaCl en lomo curado de cerdo mediante esta técnica. A su vez, fue utilizada para medir la distribución de sal durante el salado en seco de jamones para su posterior correlación con el contenido en sal del producto final (Vestergaard et al., 2005). Sin embargo, la precisión de esta técnica para el análisis de NaCl ha sido, en general, poco favorable para los propósitos prácticos (Håseth, 2008). Además, el uso de esta técnica no puede hacerse de manera "*on-line*", lo que es una gran desventaja.

La **espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR)** se basa en las diferentes formas de vibrar de las moléculas cuando interactúan con radiación electromagnética con longitud de onda entre 750 y 2500 nm. Prevolnik et al., (2011) consiguieron predecir el contenido en sal, agua y otros componentes en jamón curado. El mayor inconveniente de esta técnica es su baja capacidad de penetración.

La **espectroscopía de impedancia eléctrica** es un método de caracterización de las propiedades eléctricas de los materiales. La respuesta eléctrica puede variar en función de las cargas presentes (iones libres), la microestructura y naturaleza del electrolito y la textura, geometría y naturaleza de los electrodos (Masot, 2010). Así pues, debido a las cargas presentes de iones cloruro se puede predecir el contenido en sal mediante esta técnica, como es el caso del estudio realizado por Masot et al. (2010), donde se encontró una relación ($R^2=0.93$) entre el contenido en NaCl y la respuesta eléctrica. Rizo et al. (2013) también emplearon esta técnica para determinar el contenido en sal, humedad, y actividad de agua durante el proceso de salado del salmón ahumado.

Además, se ha estudiado el uso de **los ultrasonidos** como otro tipo de técnica de carácter no-destrutivo que permita llevar a cabo un análisis composicional de los alimentos. Se trata de una técnica rápida, de bajo coste y que además podría utilizarse de manera "on-line" en la línea de producción. Así pues, es de especial relevancia llevar a cabo estudios que sustenten esta teoría, por ejemplo para predecir cambios estructurales y composicionales de la carne de cerdo durante su salado, especialmente del contenido en NaCl.

1.5. ULTRASONIDOS

1.5.1. GENERALIDADES

Los ultrasonidos son ondas elásticas con una frecuencia superior a 20 kHz y que tienen la misma naturaleza que el sonido (Benedito, 1998). Dentro de ellos, dependiendo de la frecuencia utilizada se pueden diferenciar dos tipos: los ultrasonidos de alta intensidad o de potencia y los ultrasonidos de baja potencia o de señal. Los ultrasonidos de potencia presentan frecuencias entre 20 y 100 kHz e intensidades por encima de 1 Wcm^{-1} y son aquellos capaces de modificar un proceso o un producto. En cambio, en los ultrasonidos de señal se utilizan frecuencias desde 100 kHz hasta 1 MHz y menores intensidades ($>1 \text{ Wcm}^{-1}$). En este caso, es el producto quien modifica la señal (Mulet et al., 1999).

1.5.2. ULTRASONIDOS DE SEÑAL

En este tipo de aplicaciones se estudian los cambios que el alimento provoca sobre la onda. A partir de parámetros ultrasónicos como la velocidad y la atenuación de la onda

ultrasónica se obtiene información sobre el alimento, ya que estos dependen de las propiedades físicas del mismo (Niñoles, 2007a). De este modo, los ultrasonidos de señal son una de las tecnologías más estudiadas para realizar medidas no destructivas. Las medidas de ultrasonidos pueden llevarse a cabo de diferentes maneras, que se explican a continuación.

El modo **transmisión-recepción** se basa en la colocación de dos transductores situados opuestamente, uno en cada una de las caras de la muestra. El emisor emitirá la señal ultrasónica mientras que el receptor recibirá la energía transmitida a través del material (Mulet et al., 2002). Este modo es utilizado principalmente para la medida de la velocidad y atenuación, para caracterizar materiales atenuativos. No obstante, presenta una serie de limitaciones entre las que destaca, entre otras, la obligatoriedad de utilizar dos transductores, que estos mantengan contacto directo con la muestra y que a su vez permanezcan en posición paralela durante la medida, debiendo ser acoplados mediante un mecanismo específicamente diseñado.

En cambio, en el **modo pulso eco**, los transductores se colocan en la misma cara de la muestra. Además se puede utilizar un solo transductor, que actuará como emisor y receptor (Awad et al., 2012). En este último caso, la señal puede quedar enmascarada por la propia vibración del transductor generada al emitir la señal, lo que dificultaría la detección de señales provenientes de reflexiones ocasionadas próximas a la zona de medida (Niñoles, 2007a). Un parámetro característico de este método es la medida del **Tiempo de vuelo (t_v)**, que se define como el tiempo transcurrido desde que el equipo generador envía la señal a través del emisor (*Trigger point*) hasta que ésta es captada por el receptor. Puede ser calculado de dos formas. Para materiales atenuantes se calcula utilizando únicamente el primer eco (t_{1e}). En cambio para materiales poco atenuantes se calcula a partir del tiempo transcurrido entre el primer eco (t_{1e}) y el segundo (t_{2e}) (Figura 1.2) (Benedito, 1998; Singh et al., 2004). A su vez, mediante este parámetro se puede determinar la velocidad ultrasónica (V_{us}), que es el cociente entre el espacio recorrido (d) y el tiempo de vuelo (t_v) (Benedito et al., 2006).

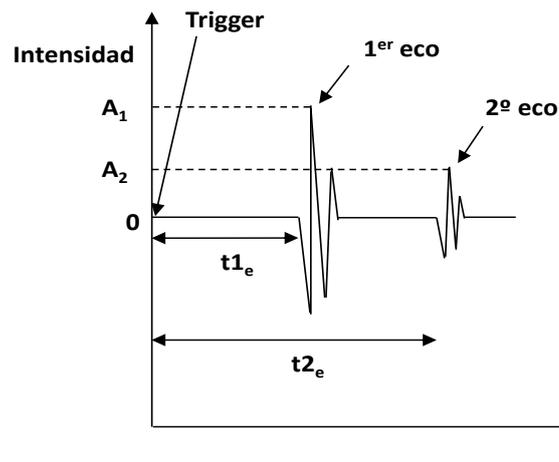


Figura 1.2. Señal obtenida a partir del modo pulso-eco.

Este método es comúnmente utilizado para detectar defectos internos en materiales de forma no destructiva, sobretodo en piezas metalúrgicas, aunque también puede usarse para estimar la velocidad y atenuación de la onda en el interior de diferentes materiales. No obstante, el uso del modo pulso-eco en alimentos para predecir cambios composicionales no está muy estudiado.

1.5.3. ULTRASONIDOS DE SEÑAL EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Los ultrasonidos se pueden aplicar en el ámbito de la Tecnología de Alimentos para determinar propiedades internas de productos, mediante técnicas no destructivas que se basan en el uso de señales ultrasónicas. Así pues, parámetros ultrasónicos como la V_{us} y la atenuación se pueden relacionar con cambios estructurales y composicionales de los alimentos. De esta manera, los ultrasonidos se han utilizado para determinar la composición de productos como frutas y verduras, aceites y grasas, productos lácteos y carnes y pescados entre otros.

Respecto a las frutas y verduras, Nielsen y Martens, (1997) encontraron una relación entre la velocidad de los ultrasonidos y el módulo de elasticidad, permitiendo conocer de forma rápida y no destructiva el efecto térmico de la cocción sobre la textura de las zanahorias. En frutas se determinó el grado de madurez de aguacates a partir de las medidas de velocidad utilizando el modo pulso-eco, observándose un descenso de la velocidad de los ultrasonidos con el descenso de la firmeza del fruto (Gaete-Garretón et al., 2005). Lo mismo ocurrió cuando Camarena y Martínez-Mora, (2006) estudiaron la variación de la firmeza de la piel de naranja durante el almacenamiento.

Entre las aplicaciones ultrasónicas en aceites y grasas, Niñosles et al. (2010) determinaron el contenido de grasa fundida en jamones. Otro estudio realizado sobre mezclas de mantequilla de cacao en aceite de colza mostró que la velocidad de los ultrasonidos es mayor al atravesar las grasas cuando estas se encuentran en formas polimórficas más estables (Singh et al., 2004).

En los productos lácteos se ha estudiado principalmente la relación entre los parámetros ultrasónicos y la composición y estructura de los quesos. Así pues, Benedito et al. (2000) fueron capaces de detectar anomalías en la estructura interna de quesos durante la elaboración mediante ultrasonidos. Esto se consiguió mediante el modo pulso-eco, detectándose huecos en el interior de queso Mahón de manera no destructiva (Benedito et al., 2001). Por otra parte, los ultrasonidos también han sido utilizados para predecir el momento óptimo de corte del cuajo durante la elaboración del queso (Benedito et al., 2002). Además, Benedito et al. (2006) monitorizaron el proceso de elaboración de quesos y se observó como la V_{us} aumentó durante la maduración de los mismos.

Por último, en el sector cárnico también se han llevado a cabo estudios mediante ultrasonidos de señal. Niñosles et al. (2007b) evidenciaron la influencia de la raza y alimentación de cerdos ibéricos sobre la velocidad ultrasónica, mediante la caracterización de la grasa dorsal. En animales vivos, Sahim et al. (2008) estimaron el contenido en grasa. Por otro lado, mediante la medida de la velocidad ultrasónica se pudo estimar las características texturales de un producto cárnico (sobrasada) durante el proceso de curado (Lull et al., 2002). No obstante aún no se han realizado estudios en productos cárnicos mediante el modo pulso-eco para predecir cambios composicionales, como puede ser el caso de la ganancia de sal durante el proceso de salado, aunque en el grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA, UPV) se han llevado a cabo experiencias de monitorización del salado de carne en modo transmisión-recepción.

Así pues, los ultrasonidos han sido ampliamente estudiados en el campo alimentario, pero se precisan de nuevas técnicas y estudios dentro de esta área para intentar facilitar su aplicación de manera "on-line" en procesos de producción, por ejemplo en el salado de productos cárnicos para predecir en continuo el contenido en NaCl.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo fue determinar la viabilidad de los ultrasonidos de señal para monitorizar el proceso de salado en seco de carne de cerdo. Para la consecución de este objetivo general se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Puesta en marcha de un equipo ultrasónico en modo pulso-eco y determinación de su viabilidad para realizar mediciones en continuo durante el salado de carne.
- Comparar el funcionamiento de dos tipos de transductores para establecer cuál de ellos se adapta mejor a esta metodología de monitorización.
- Montaje de un sistema de multiplexado con 4 transductores para comprobar su correcto funcionamiento en continuo.
- Analizar la evolución del tiempo de vuelo (t_v) durante el proceso de salado de muestras de *Longissimus dorsi* (LD).
- Determinar cómo afecta la ganancia de sal y pérdida de agua (cambios composicionales) de las muestras durante el salado al t_v de las señales ultrasónicas.
- Desarrollo de modelos matemáticos que permitan predecir la ganancia de sal de LD durante el salado a partir de las relaciones establecidas entre la composición y el tiempo de vuelo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIA PRIMA

En el presente trabajo se utilizaron un total de 12 músculos *Longissimus dorsi* (LD) (Figura 3.1) procedentes de cerdos de la raza *Large White*. Todas las piezas se adquirieron en un supermercado local una vez transcurrido la etapa post-mortem.



Figura 3.1. Músculo *Longissimus dorsi* (LD).

Tras la compra, se eliminó toda la grasa subcutánea y se ajustaron las dimensiones hasta conseguir una longitud media de 20.3 ± 0.3 cm y un peso de $1,065 \pm 131$ g. Finalmente, las piezas se envolvieron en un film plástico para evitar la pérdida de humedad y se mantuvieron en refrigeración durante 24 horas a 2°C .

3.2. EXPERIENCIAS DE SALADO EN SECO

Las experiencias de salado se llevaron a cabo con 6kg de sal gruesa humectada (10% p/p) en el interior de una cubeta de plástico, con una capacidad de 10 L, dotada de un montaje de 4 transductores en la base de la misma conectados a un sistema ultrasónico. Para llevar a cabo el salado se siguió un procedimiento donde primero se depositó una base de 2 Kg de sal cubriendo el cuerpo de los transductores y posteriormente se introdujo la pieza de carne sobre la cama de sal intentando que tomase contacto permanente con los transductores. Finalmente se cubrió toda la pieza con la sal restante (4 Kg). Las experiencias se realizaron en el interior de una cámara frigorífica (UNIC 300/2, Comersa, España) a 2°C , registrándose la temperatura tanto de la cámara como de la carne y la sal con una serie de termopares pt 100 conectados a un Datta Logger (N2014, COMARK, Korea).

Para llevar a cabo las medidas ultrasónicas, se utilizaron ultrasonidos de baja frecuencia o ultrasonidos de señal. El sistema de medida (Figura 3.2.), consta de un generador-

receptor (5058PR, Panametrics, USA) que envía una señal eléctrica a hacia un equipo de multiplexado gobernado por una tarjeta (USB-6501, National Instruments, USA) encargada de multiplexar la señal a los 4 transductores de emisión-recepción, dos de ellos de tipo A (A103S-SU de 1MHz/0.5", Olympus, Japón) y los otros dos de tipo B (A303S-RM de 1MHz/0.5", Olympus, Japón). A partir de este momento, los transductores convierten dicha señal en una onda ultrasónica que se propaga a través de la muestra y se refleja al final de la misma retornando al transductor de partida, donde se vuelve a convertir en una señal eléctrica que retorna al equipo de multiplexado. Seguidamente las señales llegan al generador-receptor donde son filtradas y amplificadas. Posteriormente, la señal y el *trigger* (disparo) son enviados al PC-Portable, equipado con una tarjeta de adquisición de datos de alta velocidad (PXI/PCI-5112, National Instruments, USA), encargada de digitalizar las señales.

Para todas las experiencias se utilizaron los mismos parámetros del generador-receptor. Estos fueron: frecuencia (100Hz), altura del pulso (200V), factor damping (100 Ω), Vernier (0 dB), atenuación (0dB), filtro (0.3 MHz para HP y OUT para LP), ganancia (40 dB), fase (normal 0°) y modo (pulso-eco).

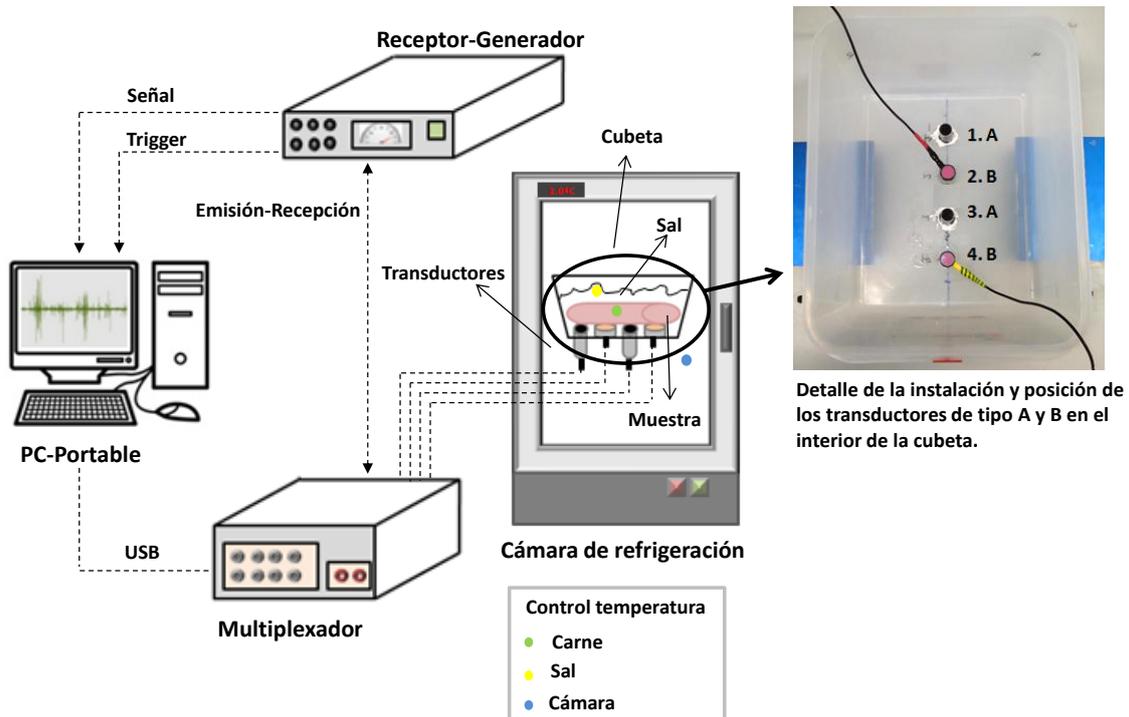


Figura 3.2. Esquema del sistema de medida del t_v .

En total, se ensayaron 5 tiempos de salado (6, 12, 24, 48 y 72 horas), realizando cada uno de ellos por duplicado.

3.3. CÁLCULO DEL TIEMPO DE VUELO

El tiempo de vuelo (t_v) se calculó mediante un programa creado en Visual Basic. Este sigue un procedimiento (Figura 3.3.) en el que se establecen una serie de parámetros de búsqueda para que una vez sobrepasado el ruido generado por la vibración del transductor, encuentre el primer punto de la señal (punto A) que supere un umbral de voltaje previamente fijado (umbral superior). A partir de este momento, retrocede a través de la señal hasta encontrar un punto (punto B) que quede por debajo de un segundo umbral (umbral inferior), que se situará cercano al valor 0 para dar un valor más exacto del tiempo de vuelo. A partir de este valor se calcula el tiempo de vuelo, que es el tiempo transcurrido desde que el transductor genera la onda ultrasónica (disparo) hasta que la recibe (1^{er} eco). Esto corresponde al tiempo de ida y vuelta de la onda a través de la muestra cárnica. En el presente trabajo el t_v será referido únicamente al tiempo que tarda la onda en atravesar la muestra (ida).

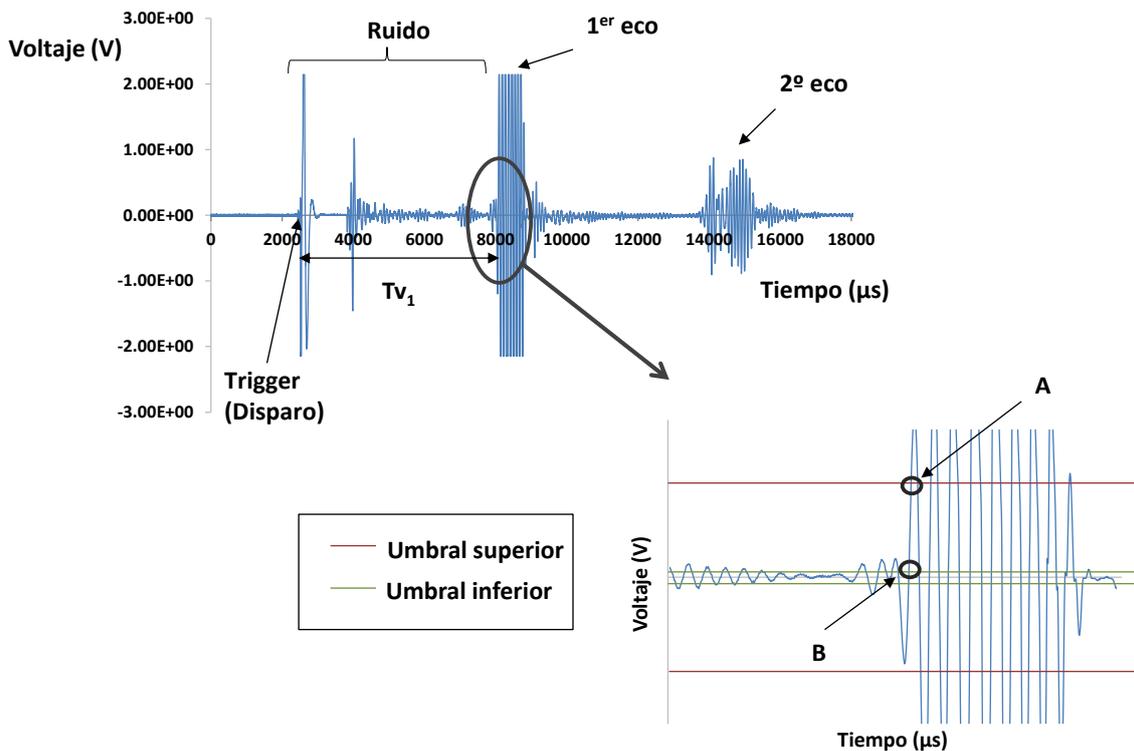


Figura 3.3. Procedimiento para el cálculo del t_v .

Para este trabajo se programó la aplicación de tal manera que el umbral inferior fue siempre de 0.03 Voltios. En cambio, el umbral superior se seleccionó para cada experiencia en función de la intensidad de la señal, variando entre 0.1 y 0.5 Voltios.

3.4. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS COMPOSICIONAL

A partir de las piezas saladas se tomaron muestras cilíndricas con ayuda de un sacabocados (5 cm de diámetro). Se obtuvieron 4 muestras saladas por cada prueba, correspondiendo cada una con la zona de contacto de los transductores con la carne (Figura 3.4.). Los cilindros extraídos se pesaron, se midieron y finalmente se trituraron por separado con una picadora (Atlantic MR-404, Braun, Alemania) para obtener una muestra homogénea.



Figura 3.4. Proceso de obtención de las muestras saladas cilíndricas.

3.5. ANÁLISIS QUÍMICOS

3.5.1. pH

La determinación de pH se llevó a cabo mediante un pH-metro (FG2-FiveGo™, Mettler Toledo, Suiza-USA) de punción específico para muestras sólidas. Se realizaron medidas de pH en las muestras frescas, por triplicado.

3.5.2. DETERMINACIÓN DE GRASA (Xg)

La determinación de grasa se llevó a cabo siguiendo el método de la AOAC 991.36 (AOAC, 1997). El método consiste en la extracción del contenido graso mediante un disolvente orgánico. El disolvente se volatiliza desde la parte inferior y llega a la zona de condensación situada en la parte superior. A partir de este momento gotea sobre la muestra hasta que el cuerpo Soxhlet tenga la cantidad suficiente de disolvente como para que este sea sifonado hacia el balón, arrastrando la grasa de la muestra. Llegado a este punto, se vuelve a volatilizar y se repite el proceso durante 6 horas. Finalmente, una vez eliminado todo el éter mediante un

rota evaporador, el contenido en grasa se cuantificó como la diferencia de peso entre los balones con grasa y los balones vacíos, todo ello dividido entre el peso de la muestra fresca ensayada expresando así el resultado como % p/p de grasa en la materia fresca (% b.h.). Se realizaron los análisis por triplicado en la materia fresca.

3.5.3. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CLORUROS (Xs)

El contenido en cloruros se determinó siguiendo la metodología explicada por Cárcel et al., (2007). El método consiste en realizar un extracto de la muestra y determinar el contenido en cloruros mediante un analizador de cloruros (MK II Chloride Analyzer 926, Sherwood, Reino Unido). El resultado se expresó como contenido en sal en la muestra (% b.h.). Se realizaron los análisis por triplicado de la muestra fresca y de las muestras saladas.

3.5.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN HUMEDAD (Xw)

El contenido en humedad de las muestras se llevó a cabo siguiendo el método de la AOAC 950.46 (AOAC, 1997). Se realizaron las determinaciones por triplicado tanto de la materia fresca como de las muestras saladas, expresándose el resultado como el contenido de agua en la muestra (% b.h.).

3.6. MODELOS DE REGRESIÓN. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para estudiar el efecto de la grasa sobre el salado se empleó un modelo lineal generalizado donde se incluyó el tiempo de salado y el contenido en grasa como variables independientes y la variación del contenido en sal como variable dependiente. A su vez, se desarrollaron modelos de regresión para predecir el contenido en sal.

Los análisis de regresión se llevaron a cabo usando Statgraphics® Centurion XVI.II (Statpoint Technologies Inc., Warrenton, VA, USA). La precisión de los modelos de predicción se estimó calculando el coeficiente de regresión (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (RMSE) (Ec. 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_e)^2}{n}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde n es el número de muestras, X_p es el valor predicho y X_e el valor experimental.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE ULTRASONIDOS

Como paso previo a la realización de las pruebas mediante el sistema de multiplexado, se llevaron a cabo dos experiencias preliminares de 48 horas, una con un transductor de tipo A y la otra con uno de tipo B. Así pues, se pudo comprobar el funcionamiento del equipo de ultrasonidos en modo pulso-eco y determinar su posible viabilidad para la monitorización del proceso de salado, que hasta el momento únicamente se había conseguido mediante el método de transmisión-recepción (De Prados et al., 2014). A través del modo pulso-eco obtenemos el parámetro ultrasónico tiempo de vuelo (t_v), que está relacionado con la velocidad ultrasónica (V_{us}), siendo ésta el cociente entre el espesor (e) y el t_v (Ec. 2).

Por otro lado, De Prados et al. (2014) observaron que la V_{us} aumentó con el tiempo de salado para piezas de LD de cerdo. Si se considera que el espesor se mantiene constante durante la etapa de salado, el valor del t_v se tendría que ver afectado mostrando una disminución gradual durante el salado.

$$V_{us} = \frac{e}{t_v} \quad (\text{Ec.2})$$

En la Figura 4.1 se muestran las señales obtenidas a las 0, 24 y 48 horas de salado para el transductor A. Observamos como los ecos sufrieron un desplazamiento temporal, obteniéndose tiempos de vuelo menores a medida que avanzaba el salado. Dichos ecos corresponden a la ida y vuelta de la onda que se propaga a través de la carne. El ruido se mantuvo constante para los tres tiempos puesto que se trata de la vibración del mismo transductor al ser excitado inicialmente. No obstante, se observaron cambios de intensidad en el ruido para cada señal, debido a las diferencias en la vibración del transductor, probablemente debido a las diferencias en el acople con la muestra durante el salado.

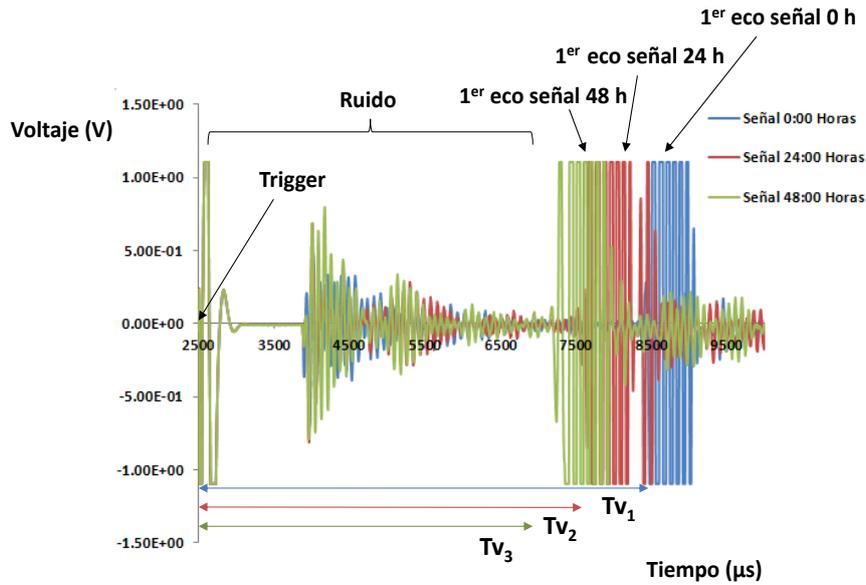


Figura 4.1. Señales obtenidas a varios tiempos de salado (0, 24 y 48 horas) (transductor A).

Por otra parte, en el transductor B se produjo el mismo efecto, es decir, las señales tomadas a tiempos mayores presentaban un t_v menor (Figura 4.2). Así pues, se pudo comprobar como el t_v disminuyó a medida que avanzaba el salado, y este efecto era independiente del tipo de transductor utilizado.

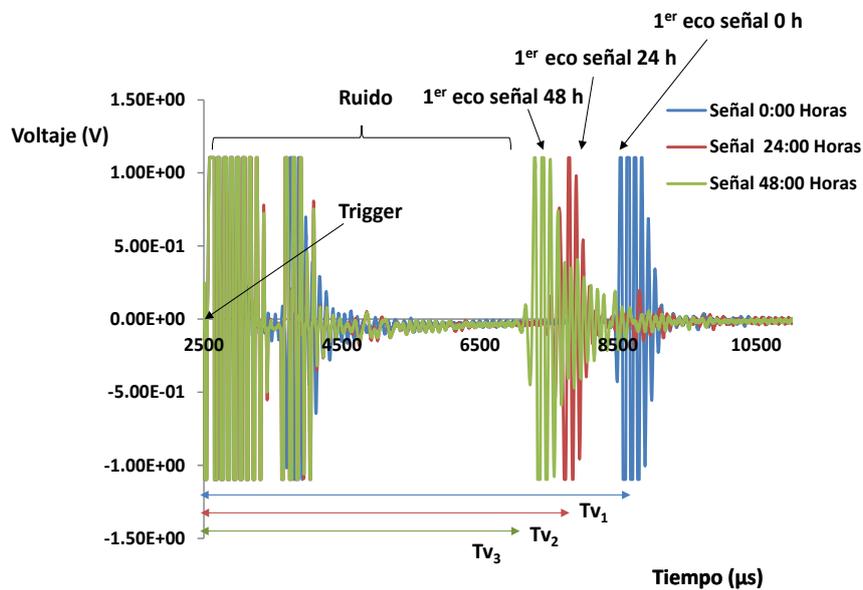


Figura 4.2. Señales obtenidas a varios tiempos de salado (0, 24 y 48 horas) (transductor B).

Por otro lado, si analizamos ambas figuras (Figura 4.1 y 4.2) y comparamos las señales obtenidas de los dos tipos de transductores podemos observar algunas diferencias. Por un lado, observamos como la intensidad de ruido es diferente para cada transductor ya que cada uno vibra de manera diferente. A su vez, el transductor B genera un ruido con una intensidad muy superior al transductor A, pero esta se mantiene a lo largo del salado a diferencia del transductor B, donde se observan oscilaciones de intensidad del ruido en los diferentes momentos del salado. También cabe resaltar que el ruido se encuentra más alejado del primer eco en el caso del transductor B que del A, lo que sería un factor a su favor para poder distinguir la señal del ruido. Respecto a los ecos recibidos correspondientes a la onda propagada a través de la muestra, cabe destacar que en el transductor A son recibidos con una intensidad (amplitud, V) superior y muestran un eco más prolongado. A pesar de que en el transductor B la intensidad no es tan elevada, la misma es suficiente para determinar los parámetros ultrasónicos necesarios, el t_v en este caso. Aunque presente una menor intensidad de señal, el transductor B presenta unas características físicas más favorables, entre las que destaca su tamaño reducido, que hace más favorable su uso para este tipo de medidas en piezas de carne para el espesor que presenta el lomo. Para piezas más grandes, como por ejemplo el jamón curado, el transductor A podría presentar la ventaja de su mayor capacidad de penetración.

En la Figura 4.3 se muestra la evolución del t_v durante toda la experiencia para los dos transductores, donde se tomaron medidas cada 5 minutos. Tanto para el transductor A como para el B se observa una disminución progresiva del t_v frente al tiempo de salado.

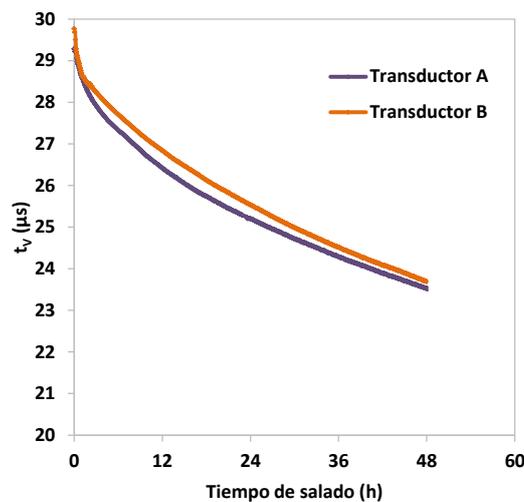


Figura 4.3. Evolución del t_v durante el periodo de salado. Transductores A y B.

En la Tabla 4.1 se detallan los valores composicionales y parámetros ultrasónicos más relevantes obtenidos en la realización de las pruebas. La variación del tiempo de vuelo (Δt_v), de sal (ΔX_s) y de agua (ΔX_w) son muy similares para ambas experiencias. Esto es debido a que las condiciones de salado fueron las mismas en los dos casos, además de que las muestras no difirieron mucho entre sí en cuanto a dimensiones y peso.

Tabla 4.1. Valores composicionales y parámetros ultrasónicos de las muestras preliminares.

	TRANSDUCTOR A	TRANSDUCTOR B
t_{vi} (μs)	29.28	29.77
t_{vf} (μs)	24.17	23.69
Δt_v (μs)	-5.12	-6.08
ΔX_s (% b.h.)	4.77	4.78
ΔX_w (% b.h.)	-6.42	-6.85
Espesor (cm)	3.92	3.99
Peso (g)	1064.4	1102.5

De este modo, a través de estas experiencias previas se pueden extraer varias conclusiones. Primero se observó que los transductores funcionaron bien por separado en el sistema ultrasónico (modo pulso-eco) y fueron capaces de trabajar de una manera continuada realizándose medidas cada 5 minutos durante un tiempo prolongado. Los ecos (1^{er} eco) de las señales se mostraron separados del ruido, con una amplitud significativa, permitiendo realizar el cálculo del t_v . Además el modo pulso-eco mostró una respuesta positiva frente a la teoría de partida donde se predecía una disminución del t_v durante el salado.

4.2. MONITORIZACIÓN DEL SALADO MEDIANTE ULTRASONIDOS

4.2.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LAS MUESTRAS CÁRNICAS

La medida del t_v se encuentra influenciada por varios factores, entre ellos las diferencias composicionales o estructurales de la materia prima. Además, los cambios en la temperatura durante la medida pueden afectar también al valor de la misma. En concreto, los cambios composicionales de las muestras cárnicas pueden afectar en gran medida al valor del t_v .

La Tabla 4.2 muestra el pH, contenido en agua (X_w), sal (X_s) y grasa intramuscular (X_g) y el peso y espesor de las muestras frescas de los músculos LD empleados en el presente estudio. Es destacable la variabilidad del contenido en agua y grasa, ya que este factor podría

influir sobre el salado puesto que se trata de diferencias composicionales de la materia prima. Además, también existe cierta variabilidad respecto al peso y espesor de la muestra, ya que muestras con un espesor y peso menores sufrirán un salado más intenso.

Tabla 4.2. Valores iniciales medios de pH, contenido en agua (Xw), sal (Xs),grasa intramuscular (Xg), peso y espesor del músculo LD.

	LD
pH	5.59 ± 0.10
Xw (% b.h.)	73.64 ± 1.70
Xs (% b.h.)	0.21 ± 0.02
Xg (% b.h.)	1.17 ± 0.58
Peso (g)	1065 ± 131
Espesor (cm)	4.46 ± 0.73

4.2.2. EVOLUCIÓN DEL TIEMPO DE VUELO DURANTE EL SALADO

La evolución del t_v de las pruebas realizadas a distintos tiempos de salado se muestra en la Figura 4.4 donde T1, T2, T3 y T4 indica la posición de cada transductor mostrándose también el tipo (A y B). El t_v se vio afectado y disminuyó durante el proceso de salado del músculo, lo cual se atribuye a cambios composicionales de la muestra que al perder agua y ganar sal aumenta su contenido en sólidos solubles y esto se ve reflejado en una disminución del t_v .

Tal y como se observa en la Figura 4.3 el t_v descendió de una manera continuada para todos los tiempos de salado estudiados, mostrándose un mayor descenso conforme aumentaba el tiempo de salado. Así pues, en la prueba de 72 horas se obtuvo una Δt_v media de $-6.97 \pm 0.97 \mu s$ frente a $-2.16 \pm 0.49 \mu s$ de la prueba de 6h.

Además, se puede percibir como el t_v no desciende de igual forma para todos los transductores de una misma muestra. Así pues se puede decir que el salado se produce de una manera irregular dentro de cada pieza por lo que unas zonas se salarán más que otras. Esto se ve reflejado claramente en la prueba de 48 horas (Figura 4.3), donde el descenso del t_v es mayor en el transductor 3 (T3) que en el resto de transductores. En la tabla 4.3 podemos observar como la zona del T3 ha incrementado el contenido en sal en mayor medida que la zona del T4. Puesto que el espesor de ambas muestras es muy similar, la ΔX_s no tendría que ser tan diferente para los dos casos. Este hecho se puede atribuir pues a diferencias composicionales y estructurales de la carne, que afectan a los procesos de transferencia de materia.

Tabla 4.3. Variación del contenido en sal y espesor para las zonas de los transductores 3 y 4 de la prueba 2 de 48 horas de salado.

Transductor	ΔX_s (% b.h.)	Espesor (cm)
T3 (A)	4.49	4.3
T4 (B)	4.25	4.5

Por otro lado, podemos observar como la medida del t_v inicial es diferente en una misma muestra para cada tipo de transductor. Como se muestra en la Tabla 4.4, este efecto es debido a la diferencia de espesor en cada zona de la muestra. A mayor espesor, la onda ultrasónica tardará más en atravesar el músculo, así pues esto se reflejará con un valor del t_v inicial más alto. No obstante, esto no presenta ninguna desventaja, puesto que el valor que se empleará para la monitorización del proceso de salado es la Δt_v correspondiente a la diferencia entre el t_{vi} y el t_{vf} , que nos indica la evolución del t_v durante el salado.

Tabla 4.4. t_v inicial respecto al espesor de la muestra (Prueba 2 de 72 horas de salado).

Transductor	Espesor (cm)	t_v inicial (μs)
T1 (A)	3.89	27.31
T2 (B)	4.11	29.26
T3 (A)	4.28	33.61
T4 (B)	4.31	35.74

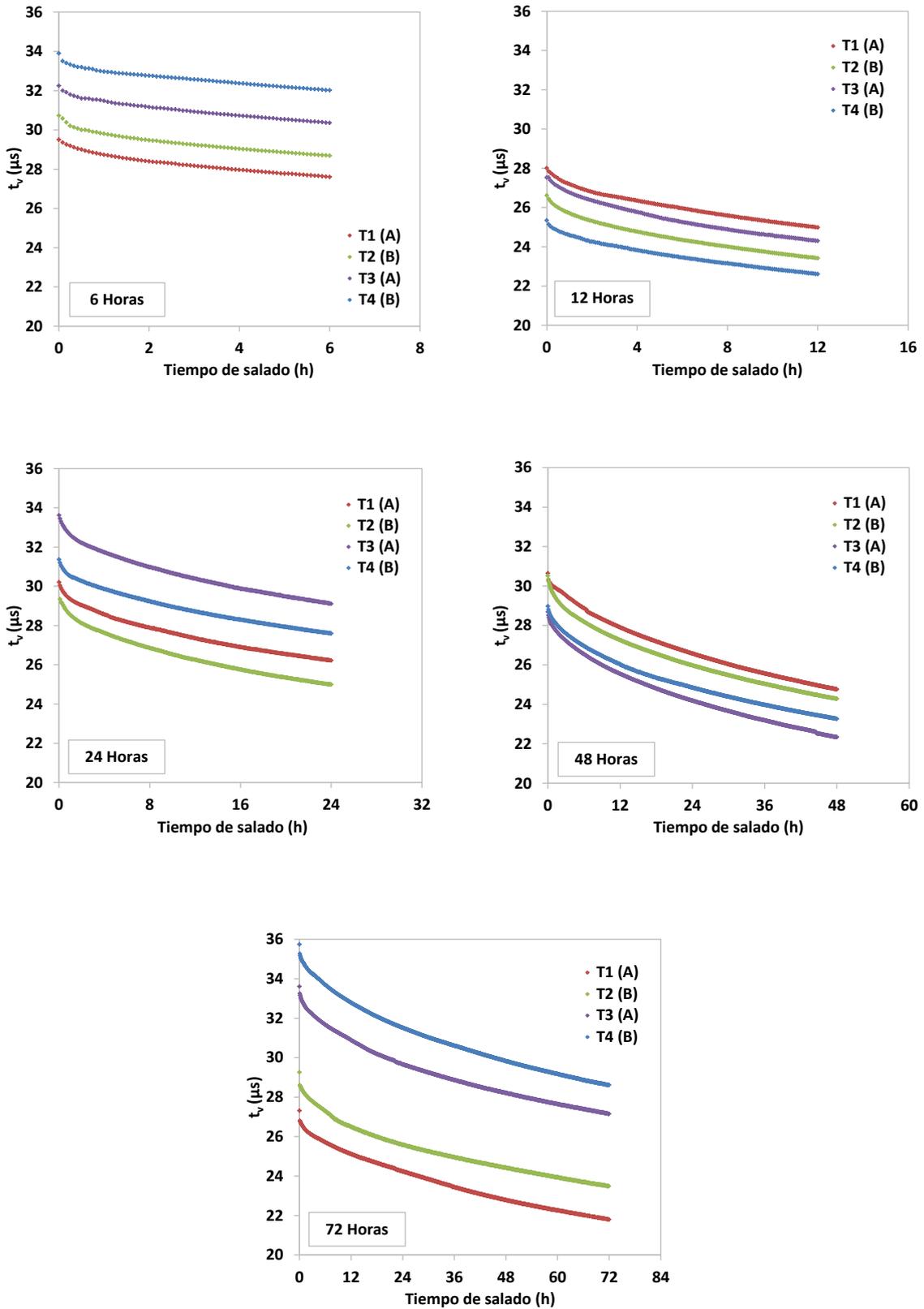


Figura 4.4. Evolución del t_v a diferentes tiempos de salado (6, 12, 24 y 72 horas).

En la Tabla 4.5 se detallan los contenidos en sal (X_s) y agua (X_w) después del salado, así como la variación de sal (ΔX_s), agua (ΔX_w) y tiempo de vuelo (Δt_v) durante esta etapa para todos los tiempos ensayados. Como se puede observar, la variación del t_v es más pronunciada a medida que aumenta el tiempo de salado, obteniéndose valores alrededor de $-2 \mu s$ para un tiempo de salado de 6 horas, hasta casi $-7 \mu s$ para el salado de 72 horas. Del mismo modo podemos observar una variación del contenido en sal y agua. El contenido en sal final varía entre 1.95 ± 0.04 y 4.81 ± 0.85 (% b.h.), dependiendo de las horas de salado, aumentando a medida que el proceso de salado es más prolongado. Ocurre lo contrario para el caso del contenido en agua final, que varía entre 72.28 ± 0.30 y 66.99 ± 0.88 (% b.h.) y disminuye a medida que aumenta el tiempo de salado. Cabe destacar la gran variabilidad en los resultados sobretodo del contenido en agua y sal, por lo que se procedió a expresarlos como variación entre el valor inicial y el final. Dicha variación será la que posteriormente se relacione con los parámetros ultrasónicos.

Como se observa en la Tabla 4.5, el descenso de t_v durante el salado se relaciona con un aumento del contenido en sal y una disminución del contenido en agua respectivamente, pese a que en algunos casos existe una variabilidad muy elevada, como por ejemplo la Δt_v en las pruebas de 48 horas de salado. Además, la ΔX_s en la prueba de 48 horas fue mayor que para la prueba de 72 horas. Esto se puede deber tanto a las diferencias composicionales de la materia prima como al propio proceso de salado en seco. La carne es heterogénea estructuralmente (Damez y Clerjon, 2008), en composición (Tabla 4.2) y perfiles de grasa. Así pues, el comportamiento de la carne durante el salado será variable (Bello, 2008). De esta manera, se podría justificar la variabilidad observada en el contenido en sal y agua como resultado de la heterogeneidad del proceso de salado que depende en gran medida de la materia prima.

Tabla 4.5. Contenido en sal (X_s) y agua (X_w) después del salado y variación del contenido en sal (ΔX_s), agua (ΔX_w) y tiempo de vuelo (Δt_v) para todos los tiempos ensayados.

	6 Horas salado	12 Horas salado	24 Horas salado	48 Horas salado	72 Horas salado
X_s (% b.h.)	1.95 ± 0.04	2.52 ± 0.73	3.42 ± 0.68	4.95 ± 0.58	4.81 ± 0.85
X_w (% b.h.)	72.28 ± 0.30	70.85 ± 0.23	70.41 ± 1.59	67.93 ± 0.96	66.99 ± 0.88
ΔX_s (% b.h.)	1.74 ± 0.06	2.34 ± 0.73	3.19 ± 0.68	4.74 ± 0.53	4.60 ± 0.82
ΔX_w (% b.h.)	-1.18 ± 0.94	-2.98 ± 1.12	-2.89 ± 1.63	-6.81 ± 0.33	-5.87 ± 1.93
Δt_v (μs)	-2.16 ± 0.49	-3.07 ± 0.21	-3.95 ± 0.42	-5.93 ± 1.27	-6.97 ± 0.97

Para estudiar la posible influencia del contenido graso sobre el salado, se desarrolló un modelo lineal generalizado donde se relacionó el contenido final de sal con el tiempo de salado y el contenido en grasa. El resultado desveló que el contenido en grasa es una variable que influye de manera significativa ($p < 0.05$) en la ganancia de sal durante el salado de piezas cárnicas. A modo de ejemplo, en la Tabla 4.6 se detalla el contenido en grasa y la ΔX_s para las pruebas 1 y 2 de 72 horas de salado. Así pues, se observa que el contenido en grasa de la prueba 2 fue aproximadamente un 48% superior al de la prueba 1, y esto se vio reflejado en un salado menos acentuado, donde la ΔX_s fue de 4.01 (%b.h.) para la prueba 2 frente al 5.18 (% b.h.) de la prueba 1.

Tabla 4.6. Contenido en grasa (Xg) y variación del contenido en sal (ΔX_s) para las pruebas 1 y 2 de 72 horas de salado.

	Pruebas 72 horas de salado	
	1	2
Xg (% b.h.)	1.13	2.18
ΔX_s (% b.h.)	5.18	4.01

4.2.3. INFLUENCIA DEL CONTENIDO EN SAL Y AGUA EN LA VARIACIÓN DEL TIEMPO DE VUELO

Puesto que en otros estudios se relacionó la ΔV_{us} con el contenido en sal y agua (Dolz, 2014; De Prados et al., 2014; García-Pérez et al., 2012), se desarrollará un parámetro que nos permita, a través de la V_{us} incluir términos como el t_v . Para ello partimos de la ΔV_{us} sabiendo que esta variación corresponde a la diferencia entre la velocidad final de la onda ultrasónica (V_f) y la inicial (V_i). A su vez, la velocidad es igual al cociente entre el espesor de la muestra (e) y el tiempo de vuelo (t_v) (Ec.3).

$$\Delta V_{us} = V_f - V_i = \frac{e_f}{t_{vf}} - \frac{e_i}{t_{vi}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Si asumimos que el espesor es constante durante el salado ($e_f = e_i$), llegamos a la Ec.4.

$$\Delta V_{us} = e_i \cdot \left(\frac{1}{t_{vf}} - \frac{1}{t_{vi}} \right) \quad (\text{Ec. 4})$$

Finalmente, ya que la velocidad inicial (V_i) es el cociente entre el espesor y el t_v inicial (t_{vi}), es posible obtener la Ec.5, donde ΔV_d es la variación de velocidad desarrollada y V_i será una constante tomada de otros estudios (1557 m/s) (Dolz, 2014).

$$\Delta V_d = V_i \cdot t_{vi} \cdot \left(\frac{1}{t_{vf}} - \frac{1}{t_{vi}} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Así pues la ΔV_d se relacionó con la ΔX_s y ΔX_w para monitorizar el proceso de salado mediante técnicas de ultrasonidos.

En la Figura 4.5 se muestra la relación entre la ΔV_d de todas las zonas analizadas para todas las pruebas realizadas y la ΔX_s de las mismas. Analizando dicha figura se puede afirmar que existe una relación lineal positiva entre la variación de velocidad desarrollada y la ganancia de sal durante el salado del músculo, siendo el coeficiente de regresión (R^2) de 0.83.

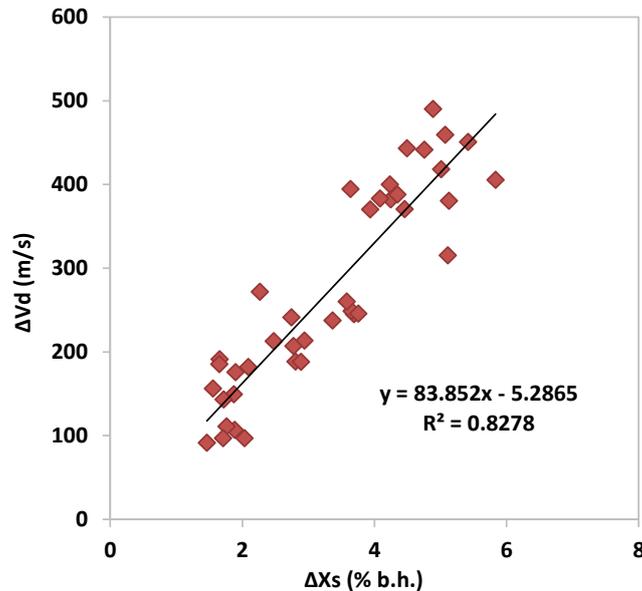


Figura 4.5. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en sal (ΔX_s).

Otros autores ya estudiaron la relación entre la variación de la concentración de sólidos solubles y la variación de la V_{us} . En este sentido, Resa et al 2004, observaron como la V_{us} disminuía al descender la concentración de sólidos solubles durante la vinificación, debido a la transformación de azúcares en etanol, lo que produce una disminución de los sólidos solubles. Por otra parte, Niños et al. (2008) observaron cambios en la V_{us} dependiendo del contenido en ácidos grasos de jamones procedentes de cerdos Ibéricos. En otro estudio realizado en mango, la V_{us} aumentaba a medida que iba madurando la fruta y aumentando la cantidad de

sólidos solubles (Valente et al., 2013). De Prados et al. (2014) también demostraron como la V_{us} aumentó con el tiempo de salado de piezas cárnicas de LD de cerdo. Así pues, observamos como la velocidad de los ultrasonidos está relacionada con cambios composicionales. De esta manera, al aumentar el contenido en sólidos solubles, la velocidad de los ultrasonidos aumenta.

Por otra parte, se relacionó la ΔV_d con la variación del contenido en agua (ΔX_w) (Figura 4.6). En dicha figura se puede identificar una relación lineal negativa entre la V_{us} y el contenido en agua. Sin embargo, cabe destacar que la pérdida de agua está asociada en gran medida a la ganancia de sal, por tanto, los cambios de la ΔV_d que se observan se deben principalmente al aumento del contenido en sal de la muestra. El coeficiente de correlación (R^2) para el caso de la relación observada en la Figura 4.6 fue muy inferior (0.69) respecto al observado en la relación entre la ΔX_s y la ΔV_d (0.83). Esto puede ser debido a una influencia menor del contenido en agua sobre la ΔV_d comparado con el efecto del incremento en el contenido en sal.

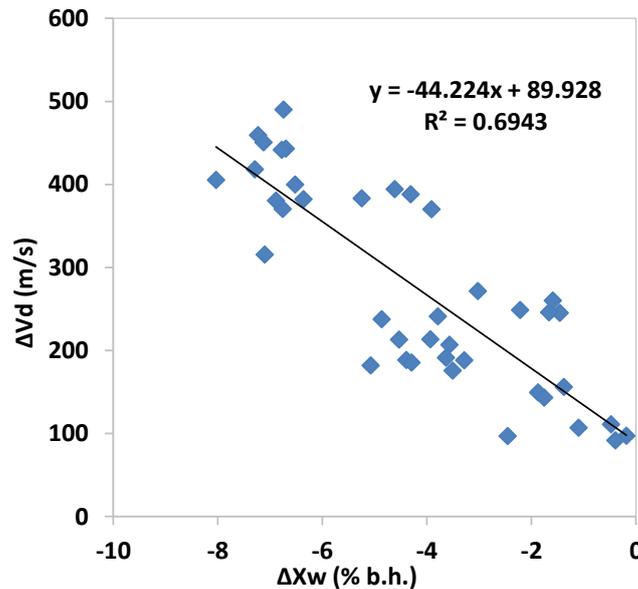


Figura 4.6. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en agua (ΔX_w).

Otros autores también encontraron una relación entre el contenido en humedad y la ΔV_{us} . Así, García-Pérez et al. (2012) demostraron que la V_{us} aumentó a medida que se reducía el contenido en humedad en muestras del músculo *Biceps femoris* procedente de cerdo de raza blanca, estableciéndose una relación lineal ($p < 0.05$). Ghaedian et al. (1998) observaron que la V_{us} descendió a medida que se aumentaba el contenido en agua en filetes de bacalao. Létang et al. (2001) también observaron como la V_{us} disminuía a medida que se aumentaba el contenido en agua en masas panarias.

La relación entre los parámetros anteriores se puede interpretar también dependiendo del tipo de transductor para intentar determinar cuál de los dos permite estimar mejor los cambios composicionales a partir del t_v . De este modo, en la Figura 4.7 se muestra la relación de ΔV_d respecto ΔX_s para los transductores A y B por separado, observándose como con el transductor B se consigue una relación lineal entre los dos parámetros con un coeficiente de ajuste ($R^2=0.88$) superior que con el transductor A ($R^2=0.68$).

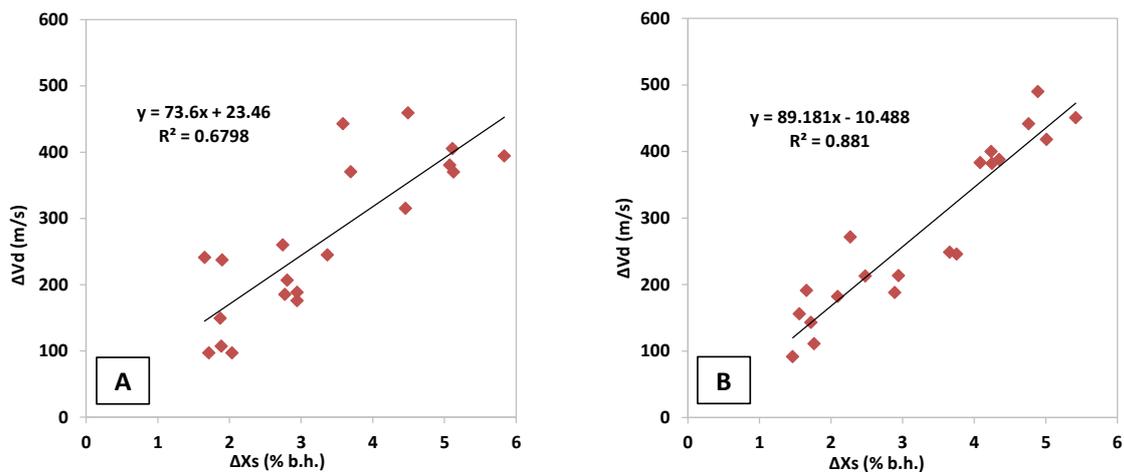


Figura 4.7. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en sal (ΔX_s) para los transductores de tipo A y B.

Lo mismo ocurre para el caso del agua (Figura 4.8), donde se puede observar como la relación lineal entre la ΔV_d y ΔX_w se adapta mejor en el caso del transductor B ($R^2=0.72$) que en el transductor A ($R^2=0.65$). Aquí también se puede apreciar cómo, independientemente del tipo de transductor utilizado, la variación del contenido en agua se relaciona peor con ΔV_d que para el caso de ΔX_s .

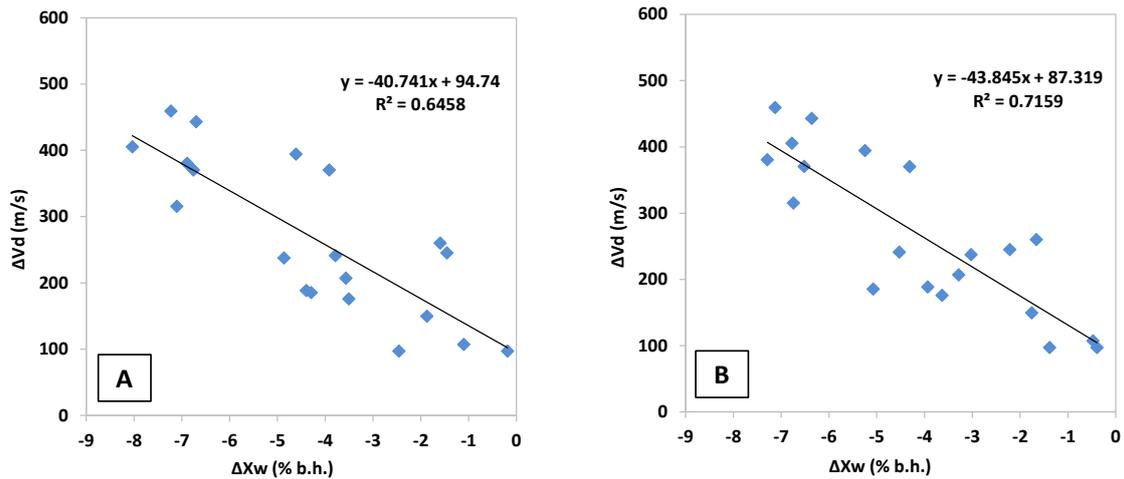


Figura 4.8. Relación entre la variación de la velocidad desarrollada (ΔV_d) y la variación del contenido en agua (ΔX_w) para los transductores A y B.

De este modo, se puede considerar que el transductor de tipo B se adaptaría mejor a este tipo de método ultrasónico en comparación al transductor de tipo A puesto que además de las mejores relaciones obtenidas, posee unas características físicas favorables (tamaño reducido y mejor acople), así como mayor facilidad a la hora de llevar a cabo su instalación. No obstante habría que comprobar su comportamiento frente a piezas más grandes, por ejemplo el jamón.

4.3 PREDICCIÓN DEL CONTENIDO EN SAL MEDIANTE ULTRASONIDOS

El contenido en sal de los productos cárnicos crudo-curados es uno de los factores más relevantes a la hora de determinar su calidad final y estabilidad. Es por ello que cualquier técnica no-destruccionista destinada a predecir el contenido en sal de este tipo de productos supone una gran ventaja a nivel industrial. Por otro lado, también sería interesante poder predecir el contenido en agua final, aunque este parámetro, al estar relacionado con la ganancia de sal y modificarse en etapas posteriores del procesado, no presenta la misma relevancia. Así pues, únicamente se tendrá en cuenta la variación del contenido en sal (ΔX_s) para desarrollar los modelos.

A continuación, mediante técnicas de regresión, se desarrollarán dos modelos para cuantificar como la ΔX_s influye en diferentes parámetros ultrasónicos. Así pues, los modelos serán desarrollados de tal manera que realizando medidas ultrasónicas al principio y al final del salado se pueda predecir el contenido en sal final del producto. Finalmente se comprobarán ambos modelos para examinar su capacidad de predicción.

4.3.1 DESARROLLO DE MODELOS

4.3.1.1. MODELO 1

El modelo 1 se desarrollará a partir del parámetro ultrasónico (ΔV_d) descrito anteriormente (Ec.5) donde se incluye el valor inicial de la velocidad de los ultrasonidos V_i . Así pues, se trata de un modelo basado en una teoría ya estudiada con anterioridad, donde se relaciona la velocidad de los ultrasonidos con la variación del contenido en sal.

A partir de la relación entre ΔV_d y ΔX_s mediante regresión lineal simple se obtiene la Ec.6, que se puede considerar como un sencillo modelo predictivo a través del cual se puede estimar la ganancia de sal de una muestra cárnica durante el proceso de salado.

$$\Delta X_s = \frac{5.29 + \Delta V_d}{83.85} \quad (\text{Ec. 6})$$

En la Figura 4.9 se observan los valores experimentales de la variación del contenido en sal ($\Delta X_s \text{ exp}$) frente a los valores calculados ($\Delta X_s \text{ cal}$) a partir del modelo representado anteriormente (Ec. 6). Se puede observar como se ha obtenido un modelo con una capacidad razonable para predecir el contenido en sal ($R^2=0.79$). A su vez, el error de predicción medio (RMSE) del modelo es de 0.59%. De esta manera, el modelo 1 consta de una ecuación sencilla para predecir el contenido en sal de muestras cárnicas, contemplando el valor de la velocidad inicial y el tiempo de vuelo inicial y final como parámetros ultrasónicos. Teniendo en cuenta que el sistema de medida no tiene aplicación como técnica analítica, el error cometido por el modelo se puede considerar como aceptable de cara a su uso como herramienta de control a nivel industrial.

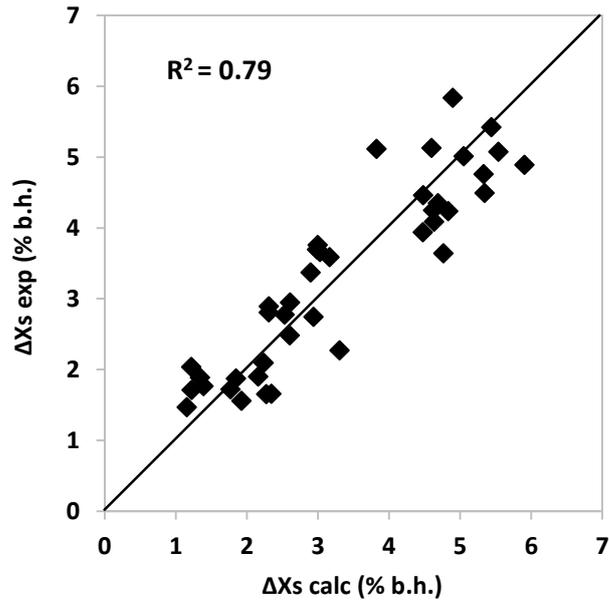


Figura 4.9. Ganancia de sal experimental ($\Delta X_s \text{ exp}$) frente a la calculada ($\Delta X_s \text{ cal}$) a partir del modelo 1 para todas las muestras

4.3.1.2. MODELO 2

El modelo 2 se desarrolló a partir las medidas inicial y final del tiempo de vuelo, parámetro ultrasónico característico del modo pulso-eco.

Así pues, mediante una regresión polinómica múltiple se desarrolló el modelo relacionando la variación del contenido en sal con el tiempo de vuelo. Se obtuvo el modelo (Ec. 7) a partir de la relación entre ΔX_s y el tiempo de vuelo inicial (t_{vi}) y final (t_{vf}). Este modelo, a diferencia del anterior presenta la gran ventaja de evitar partir de un valor (V_i) obtenido de la bibliografía.

$$\Delta X_s = 0.0091 t_{vi}^2 - 0.66 t_{vf} + 11.87 \quad (\text{Ec. 7})$$

En la Figura 4.10 se comparan los valores de ΔX_s experimentales con los calculados con el modelo 2 (Ec. 7) para todas las muestras analizadas. Así pues, en esta figura se puede apreciar la buena capacidad de predicción del modelo desarrollado ($R^2=0.86$) basado en la medida del t_v en muestras cárnicas al inicio y al final del salado. Si comparamos el error medio de predicción de este modelo (0.48%) con el error medio cometido por el modelo 1 (0.59%), se observa una importante mejora.

Por otra parte, Fulladosa et al. (2010) desarrollaron un modelo para predecir el contenido en sal en piezas cárnicas mediante una técnica no-destructiva como es la Tomografía Computarizada (CT) basada en rayos X. Este modelo presentó un error medio de predicción de 0.47%. Como podemos observar, el RMSE obtenido mediante esta tecnología no difiere mucho del obtenido en el modelo 2 del presente trabajo (0.48%).

Así pues, el modelo 2 basado en el cálculo del tiempo de vuelo al inicio del salado y al final del mismo, se puede considerar como una herramienta fiable para predecir de una forma sencilla el incremento del contenido en sal de piezas cárnicas durante el salado. Por tanto, el modo pulso-eco se muestra como una técnica capaz de monitorizar on-line procesos de salado en las líneas de producción.

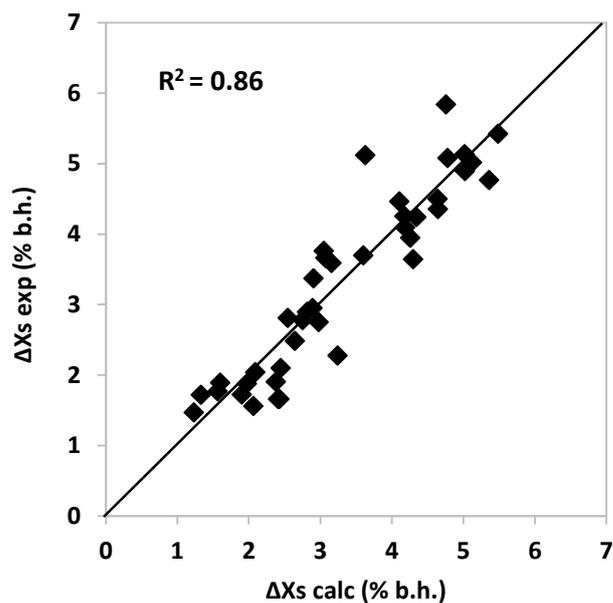


Figura 4.10. Ganancia de sal experimental ($\Delta X_{s\text{exp}}$) frente a la calculada ($\Delta X_{s\text{calc}}$) a partir del modelo 2 para todas las muestras.

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

A partir de la realización del presente trabajo se pueden extraer las conclusiones que se detallan a continuación:

- El modo pulso-eco se mostró viable para la monitorización del proceso de salado de carne mediante ultrasonidos, tanto con un solo transductor como con 4 transductores funcionando a través de un sistema de multiplexado.
- Los dos tipos de transductores puestos a prueba respondieron bien frente a esta técnica, considerándose más práctico el transductor de tipo B de cara a su aplicación a nivel industrial.
- El tiempo de vuelo se vio afectado a partir de los cambios composicionales de la carne generados a partir del proceso de salado (ganancia de sal y pérdida de agua) y mostró una variación durante el salado (Δt_v). Se obtuvieron relaciones significativas ($p < 0.05$) entre la Δt_v y el contenido en sal y agua para los músculos LD analizados. La sal tuvo una mayor influencia que el agua sobre la Δt_v .
- Se desarrollaron dos modelos para predecir el contenido en sal de piezas cárnicas de LD. El modelo 1 se desarrolló partiendo del parámetro ultrasónico ΔV_d . El modelo 2 se desarrolló a partir de un ajuste polinómico, empleando los tiempos de vuelo al inicio y final del salado como parámetros del mismo. Ambos modelos fueron capaces de predecir el contenido en sal de una manera aceptable.
- Se evidenció la viabilidad de los ultrasonidos de señal en modo pulso-eco como técnica de control no destructiva para determinar la ganancia de sal durante el salado en pila de carne de cerdo.

6. BIBLIOGRAFÍA

5. BIBLIOGRAFÍA

Albarracín W., Sánchez I. C., Grau R., Barat J. M. (2011). Salt in food processing; usage and reduction: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 1329-1336.

Aristoy M.C., Armenteros M., Barat J.M., Toldrá F. (2009). Biochemical changes in dry-cured loins salted with partial replacements of NaCl by KCl. *Food Chemistry*, 117, 627-633.

Armenteros M. (2010). Reducción de sodio en lomo y jamón curados. Efecto sobre la proteólisis y las características sensoriales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

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., Rodríguez -Barona S., Andrés A., Fito P. (2003). Cod salting manufacturing analysis. *Food Research International* 36, 447-453.

Bello J. (2008). Jamón curado, aspectos científicos y tecnológicos. Perspectiva desde la Unión Europea. "Planteamiento tecnológico del procesado de curación". Ed: Díaz de Santos, 171-253.

Benedito J.J. (1998). Contribución a la caracterización de quesos mediante el uso de ultrasonidos de señal. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Benedito J.J., Cárcel J.A., Gisbert M., Mulet A. (2001). Quality control of cheese maturation and defects using ultrasonics. *Food Engineering and Physical Properties*, 66, 100-104.

Benedito J.J., Cárcel J.A., González R., Mulet A. (2002). Application of low intensity ultrasonics to cheese manufacturing processes. *Ultrasonics*, 40, 19-23.

Benedito J.J., Cárcel J.A., Sanjuan N., Mulet A. (2000). Use of ultrasound to assess Cheddar cheese characteristics. *Ultrasonics*, 38, 727-730.

Benedito J.J., Simal S., Clemente G., Mulet A. (2006). Manchego cheese texture evaluation by ultrasonics and surface probes. *International Dairy Journal*, 16, 431-438.

Camarena F., Martínez-Mora J.A. (2006). Potencial of ultrasound to evaluate turgidity and hydration of the orange peel. *Journal of Food Engineering*, 75, 503-507.

Cárcel J.A., Benedito J., Bon J., Mulet A. (2007). High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Science*, 76, 611-619.

Chiralt A., Fito P., Barat J.M., Andrés A., González-Martínez C., Escriche I., Camacho M.M. (2001). Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal of Food Engineering* 49 (2-3), 141-151.

Damez J-L., Clerjon S. (2008). Meat quality assessment using biophysical methods related to meat structure. *Meat Science*, 80, 132-149.

De Prados M., García J.V., Fulladosa E., Mulet A., Benedito J.J. (2014). Monitorización del salado en pila de *Longissimus dorsi* mediante ultrasonidos de señal. En Fito P., Andrés A.M., Argüelles A., Ortolá M.D. (Editores). Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos (CIBIA9). Libro de Actas. Vol I. Valencia, España.

Dolz S. (2014). Caracterización no-destrucciona del salado en salmuera de carne de cerdo mediante ultrasonidos de señal. Trabajo fin de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia

Frøystein T., Sørheim O., Berg SA., Dalen K. (1989). Salt distribution in cured hams, studied by computer X-ray tomography. *Fleishwirtschaft*, 69, 220–22.

Fulladosa E., Santos-Garcés E., Picouet P., Gou P. (2010). Prediction of salt and water content in dry-cured hams by computed tomography. *Journal of Food Engineering*, 96, 80-85.

Gaete-Garretón L., Vargas Y., León C., Pettorino A. (2005). A novel non-invasive ultrasonic method to assess avocado ripening. *Food Engineering and Physical Properties*, 70, 187-191.

García-Pérez J.V., De Prados M., Pérez-Muelas N., Cárcel J.A., Benedito J.J. (2012). Ultrasonic characterization of pork meat salting. *Materials Science and Engineering*, 42, 1-4.

Ghaedian R., Coupland J.N., Decker E.A., McClements D.J. (1998). Ultrasonic Determination of Fish Composition. *Journal of Food Engineering*, 35, 323-337.

Gisbert M. (2001). Influencia de las variables de proceso en la evolución físico-química y bioquímica del lomo embuchado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Gómez J.A. (2012). Modelización de las cinéticas de difusión de nitrato de sodio y nitrito de sodio durante el salado de carne. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Grau R. (2002). Modificaciones en el proceso tradicional de elaboración de jamón curado salado en salmuera y empleo de materia prima congelada. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Håseth T.T., Hoy M., Kongsro J., Kohler A., Egelandsdal B. (2008). Determination of Sodium Chloride in Pork Meat by Computed Tomography at Different Voltages. *Journal of Food Science*, 73, 333-339.

Honikel K.O. (2008). The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products. *Meat Science*, 78(1-2), 68-76.

Kalender W.A. (2005). Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications. Publicis Corporate Publishing, 304.

Lawrence T.E., Dikeman M.E., Stephens J.W., Obuz E., Davis J.R. (2003). In situ investigation of the calcium-induced proteolytic and salting-in mechanisms causing tenderization in calcium-enhanced muscle. *Meat Science*, 66, 69-75.

Létang C., Piau M., Verdier C., Lefebvre L. (2001). Characterization of wheat-flour-water doughs: a new method using ultrasound. *Ultrasound*, 39, 133-141.

Llull P., Simal S., Benedito J.J., Rosselló C. (2002). Evaluation of textural properties of a meat-based product (sobrassada) using ultrasonic techniques. *Journal of Food Engineering*, 53(3), 279-285.

Martínez N., Andrés A.M., Chiralt A., Fito P. (2011). Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno. "Mecanismo difusional en alimentos". Ed: Universidad Politécnica de Valencia, 277-312.

Masot R. (2010). Desarrollo de un sistema de medida basado en espectroscopía de impedancia para la determinación de parámetros fisicoquímicos en alimentos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Masot R., Alcañiz M., Fuentes A., Schmidt F., Barat J.M., Gil L., Baigts D., Martínez R., Soto J. (2010). Design of a low-cost nondestructive system for punctual measurements of salt levels in food products using impedance spectroscopy. *Sensors and Actuators*, 158, 217-223.

McDonnell C.K., Allen P., Chardonnerau F.S., Arimi J.M., Lyng J.G. (2014). The use of pulsed electric fields for accelerating the salting of pork, *LWT. Food Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.05.053.

Mora L. (2010). Determinación de compuestos bioquímicos para el control de calidad en la elaboración de jamón cocido y jamón curado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

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

Mulet A., Benedito J., Golás Y., Cárcel J.A. (2002). Noninvasive ultrasonic measurements in the food industry. *Food Reviews International*, 18, 123-133.

Nielsen M., Martens H.J. (1997). Low frequency ultrasonics for texture measurements in cooked carrots (*Daucus carota L.*). *Journal of Food Science*, 62, 1167-1175.

Niñoles L. (2007a). Contribución a la caracterización de la calidad de productos del cerdo mediante ultrasonidos de señal. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Niñoles L., Clemente G., Ventanas S., Benedito J.J. (2007b). Quality assessment of Iberian pigs through backfat ultrasound characterization and fatty acid composition. *Meat Science*, 76, 102-111.

Niñoles L., Mulet A., Ventanas S., Benedito J.J. (2010). Ultrasonic assessment of the melting behavior in fat from Iberian dry-cured hams. *Meat Science*, 85, 26-32.

Niñoles L., Sanjuan N., Ventanas S., Benedito J.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.

Pérez J.A. (2006) *Ciencia y tecnología de carnes*. "Aspectos tecnológicos de los productos crudo-curados" Ed: Limusa, 463-480.

Pérez-Álvarez J.A., Sánchez M.E., Sayas M.E., Fernández J., Gago M.A., Pagán M.J., López F., Aranda V. (1997). Chemical and color characteristics of "Lomo embuchado" during salting seasoning. *Journal of Muscle Food* 8(4): 395-411.

Pivnic H. (1983). *Ecología Microbiana de los Alimentos 1: Factores que afectan a la supervivencia de los microorganismos en los alimentos*. International Commission on Microbiological Specifications for Foods. "Sales de curado y sustancias análogas". Ed: Acribia, 143-167.

Prevolnik M., Škrlep M., Janeš L., Velikonja-Bolta S., Škorjanc D., Čandek-Potokar M. (2011). Accuracy of near infrared spectroscopy for prediction of chemical composition, salt content and free amino acids in dry-cured ham. *Meat Science*, 88, 299-304.

Resa P., Elvira L., Montero F., González R., Barcenilla J. (2008). On-line ultrasonic velocity monitoring of alcoholic fermentation kinetics. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 32, 321-331.

Rizo A., Fuentes A., Fernández I. (2013). Desarrollo de un nuevo método de salado-ahumado de salmón y monitorización del proceso por espectroscopia de impedancia. Trabajo final de máster. Universidad Politécnica de Valencia.

Sahim E.H., Yardimci N., Cetingul I.S., Bayram I., Sengor E. (2008). The use of ultrasound to predict the carcass composition of live Akkaraman lambs. *Meat Science*, 79, 716-721.

Seeram E. (2001). *Computed tomography: physical principles, clinical applications, and quality control*. Ed: Saunders Elsevier.

Silva J.G., Morais H.A., Silvestre M.P.C. (2003). Comparative study of the functional properties of bovine globin isolates and sodium caseinate. *Food Research International*, 36, 73-80.

Singh A.P., McClements D.J., Maragoni A.G. (2004). Solid fat content determination by ultrasonic velocity. *Food Research International*, 37, 545-555.

Sørheim O., Berg SA. (1987). Computed x-ray tomography (CT) as a non-destructive method to study salt distribution in meat. *Proceedings Euro Food Chem IV*, 196-200.

Valente M., Prades A., Laux D. (2013). Potential use of physical measurements including ultrasound for a better mango fruit quality characterization. *Journal of Food Engineering*, 116, 57-64.

Ventanas J. (2001). *Tecnología del Jamón Ibérico. De los sistemas tradicionales a la explotación racional del sabor y el aroma. "La estabilización del pernil desde la perspectiva microbiológica: Un concepto ecológico dinámico"*. Ed: Mundi-prensa, 201-226.

Vestergaard C., Erbou S., Thauland T., Adler-Nissen J., Berg P. (2005). Salt distribution in dry-cured ham measured by computed tomography and image analysis. *Meat Science*, 69, 9–15.

Vestergaard C., Risum J., Adler-Nissen J. (2004). Quantification of salt concentrations in cured pork by computed tomography. *Meat Science*, 68, 107–13.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

FOOD DRINK EUROPE 2013: www.fooddrinkeurope.eu (Fecha de consulta: 8/6/14)

INE 2013: www.ine.es (Fecha de consulta: 8/6/14)

MAGRAMA 2014: www.magrama.gob.es (Fecha de consulta: 8/6/14)

ANICE 2014: www.anice.es (Fecha de consulta: 14/6/14)

EUROCARNE 2014: www.eurocarne.com (Fecha de consulta: 14/6/14)