

MONITORIZACIÓN DEL SALADO DE CARNE DE CERDO (*BICEPS FEMORIS*) MEDIANTE ULTRASONIDOS DE SEÑAL

Marta de Prados Pedraza. José Vicente García Pérez. José Javier Benedito Fort.¹

RESUMEN

La creciente preocupación de los consumidores por reducir la cantidad de NaCl en la dieta y la variabilidad en el contenido final en sal en los productos crudo-curados está impulsando a las empresas cárnicas a desarrollar nuevas tecnologías que monitoricen los procesos de salado. En este trabajo, se utilizaron las medidas de velocidad ultrasónica para monitorizar el proceso de salado de muestras de carne de cerdo (*Biceps Femoris*).

Se midió la velocidad de ultrasonidos en muestras cilíndricas de carne a diferentes tiempos de salado (24, 48, 96 y 168 horas). Por otra parte, se prepararon muestras con concentración de agua y NaCl conocidas, con el objetivo de separar el efecto de estos parámetros en la velocidad de los ultrasonidos. Además, se determinó la cantidad de NaCl y agua en las diferentes muestras.

Los resultados mostraron que a medida que transcurrió el tiempo de salado se incrementó el contenido en NaCl y disminuyó el contenido de agua. Tanto el transporte de sal como el transporte de agua tuvieron comportamiento difusional. La ganancia de sal y la pérdida de agua incrementó el contenido en sólidos en las muestras y conllevó un aumento de la velocidad de los ultrasonidos, estableciéndose relaciones lineales significativas ($p < 0.05$) entre la velocidad ultrasónica y el contenido de sal y agua. Se observó que el efecto del contenido en sal sobre los cambios de velocidad ultrasónica resultó ser mayor que el efecto del agua. Por lo tanto, las medidas no destructivas ultrasónicas podrían ser utilizadas a nivel industrial para monitorizar el proceso de salado de carne de cerdo.

PALABRAS CLAVE: Ultrasonidos, salado, productos crudo-curados.

ABSTRACT

The increasing concern of the consumers about the reduction of the salt content in the diet and the great variability in the final salt content of dry-cured products are motivating meat industries to develop new technologies to monitor the salting stage. Therefore, in the present work, ultrasonic velocity measurements were used to monitor the salting process of pork meat samples (*Biceps Femoris*).

¹ Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA). Departamento de Tecnología de los Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. Con. De Vera s/n, 46071 Valencia. España

Ultrasonic velocity was measured in cylindrical meat samples at different salting times (24, 48, 96 and 168 hours). Also, model samples with preestablished salt and moisture content were prepared to split the effect of salt and moisture content on the ultrasonic velocity. Finally, the NaCl and moisture content was determined in all the samples.

Results showed that the salt content increased and the water content decreased during salting. The salt and water transport followed diffusion mechanisms. The ultrasonic velocity increased due to the salt gain and the moisture loss, which increased the solid content in the liquid phase. Significant ($p < 0.05$) linear relationships were found between the ultrasonic velocity and the salt and moisture contents. Furthermore, the salt content effect was larger than the water content effect on the ultrasonic velocity. Therefore, the non-destructive ultrasonic measurements could be used to monitor the salting process of pork meat in the meat industry.

KEY WORDS: Ultrasonic, salting, dry-cured products.

RESUM

La creixent preocupació dels consumidors per reduir la quantitat de NaCl en la dieta i la variabilitat en el contingut en sal en els productes cru-curats està impulsant a les empreses càrnies a desenvolupar noves tecnologies que monitoritzen els processos de salat. En aquest treball, es va utilitzar les mesures de velocitat ultrasònica per monitoritzar el procés de salat de mostres de carn de porc (*Biceps Femoris*).

Es va mesurar la velocitat d'ultrasons en mostres cilíndriques de carn a diferents temps de salat (24, 48, 96 i 168 hores). D'altra banda, es van preparar mostres amb concentració d'aigua i NaCl conegudes, amb l'objectiu de separar l'efecte d'aquests paràmetres en la velocitat dels ultrasons. A més, es va determinar la quantitat de NaCl i aigua en les diferents mostres.

Els resultats van mostrar que a mesura que va transcórrer el temps de salat es va incrementar el contingut en NaCl i va disminuir el contingut d'aigua. Tant el transport de sal com el transport d'aigua tingueren un comportament difussional. El guany de sal i la pèrdua d'aigua incrementà el contingut en sòlids en les mostres i va comportar un augment de la velocitat dels ultrasons, establint relacions lineals significatives ($p < 0.05$) entre la velocitat ultrasònica i el contingut de sal i aigua. Es va observar que l'efecte del contingut en sal sobre els canvis de velocitat ultrasònica resultà ser més important que l'efecte de l'aigua. Per tant, les mesures no destructives ultrasòniques podrien ser utilitzades a nivell industrial per monitoritzar el procés de salat de carn de porc.

PARAULES CLAU: Ultrasons, salat, productes cru-curats.

INTRODUCCIÓN

El salado es un método común de conservación de los alimentos crudos-curados, no solo porque inhibe el crecimiento microbiano, sino también porque modifica otras características sensoriales del alimento. Durante el salado se produce simultáneamente una entrada de sal y una salida de agua, este efecto combinado contribuye a la estabilización de la materia prima. La sal favorece la estabilidad de los productos cárnicos porque tiene función bacteriostática, debido al descenso de la actividad de agua. Además, la pérdida de agua que tiene lugar y la acción de la sal sobre la solubilidad de las proteínas y la inhibición de enzimas proteolíticas, contribuye a la textura final del producto. Por otra parte, la sal contribuye a que se desarrolle el color, sabor y aroma característicos de estos productos (Larrea, 2003).

Uno de los productos crudos-curados de mayor valor añadido y que destaca por sus propiedades organolépticas es el jamón. Su etapa de salado es fundamental para la curación de las piezas. Al principio del proceso de salado, las zonas externas muestran mayores concentraciones de sal, pero esa tendencia se invierte durante la maduración, debido a la penetración de la sal desde las zonas externas más secas, a las internas más húmedas (Larrea, 2003). El tiempo de salado oscila entre 0.65 y 2 días/kg de jamón, dependiendo de la cantidad de sal deseada en el producto final y la tecnología aplicada (Zumalacarregui, 1997). Además, durante la etapa de salado, la ganancia de sal es del 4 ± 1 % y la pérdida de agua es de alrededor de 8 ± 1 %, por lo que el producto tiene una pérdida de peso de 4 ± 1 % respecto del peso inicial (Bello, 2008).

Actualmente existe un creciente interés por parte de las industrias en controlar el proceso de salado. Uno de los principales motivos es que pese a que las industrias controlan en las cámaras de salado la temperatura y la humedad relativa para obtener productos de calidad uniforme; sigue existiendo una gran variabilidad en el contenido de sal del producto final, debido entre otros factores, a la variabilidad de composición y estructura de la carne fresca (Bello, 2008). Por otro lado, hay una creciente demanda de los consumidores de productos bajos en sal, debido a cambios en las preferencias sensoriales y a la creciente preocupación por los altos niveles de sodio en la dieta. Todo ello, impulsa a las industrias a controlar de forma más exhaustiva la concentración de sal en este producto.

Algunas de las técnicas utilizadas hasta el momento para caracterizar el jamón son: la calorimetría diferencial de barrido (DSC), el análisis químico, la textura instrumental, la medida de color y pH y la nariz electrónica (Niñoles, 2007). La mayoría de estas técnicas son destructivas, laboriosas y lentas. Dado el alto valor añadido de los productos derivados del cerdo, resulta de gran interés la búsqueda de técnicas no destructivas, tales como los ultrasonidos de señal. Esta técnica analítica, además de ser rápida y económica, resulta precisa y fácilmente automatizable on-line, lo que puede facilitar su difusión en la industria frente a los métodos tradicionales que generalmente resultan laboriosos y difícilmente automatizables (Mulet et al., 1999a).

La aplicación de ultrasonidos de señal en el control de los productos se basa en la determinación de una serie de parámetros ultrasónicos que se relacionen con las características físico-químicas del alimento. Una de las variables que se utilizan es la velocidad ultrasónica. El estudio de la relación de esta variable con cambios de composición en productos cárnicos, ya se ha llevado a cabo en sobrasada (Llull et al., 2002a), en la estimación del contenido en grasa de músculos de carne (Whittaker et al., 1992) y en la caracterización de cerdo ibérico en función de la raza y la alimentación (Niñoles et al., 2007, Niñoles et al., 2008). Además, esta técnica también se ha utilizado en otras industrias de alimentos para determinar cambios de composición durante el proceso, como en la fermentación alcohólica (Resa et al., 2004) y en el control de calidad en la maduración de queso (Benedito et al., 2001). Desde nuestro conocimiento, los ultrasonidos de señal nunca antes han sido utilizados para determinar cambios de composición durante el salado de productos cárnicos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente indicado, el objetivo de este trabajo es el empleo de medidas ultrasónicas no destructivas para monitorizar la etapa de salado de carne de cerdo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Se utilizaron pernils de cerdo Large White (LW) de los cuales se extrajo el músculo *Biceps Femoris* (BF). A partir de este músculo, se prepararon dos tipos de muestras en función de las pruebas que se iban a realizar. Por un lado se obtuvieron 12 cilindros de carne (37 mm de diámetro y 60±10 mm de altura) con la ayuda de un sacabocados. El corte para la extracción de los cilindros se realizó en el sentido perpendicular a las fibras, de esta manera la entrada de sal durante el salado y la transmisión de las ondas ultrasónicas durante la medida de velocidad sería también en el sentido perpendicular a las fibras. Por el otro lado, el músculo se trituró con una picadora (Blixer 2, Robot coupe, France) hasta obtener una muestra homogénea.

Determinación de la sal y la humedad

La humedad y el contenido en sal de las muestras de carne se determinaron mediante métodos estándar (AOAC, 1997).

La determinación de humedad en las muestras se realizó de acuerdo con el método de la AOAC 950.46. Para ello, se pesó un crisol de vidrio en el que anteriormente se colocaron aproximadamente 3 g de arena de mar lavada, totalmente seca, y una varilla de vidrio. Posteriormente, se agregó la muestra triturada (3 g) en el interior del crisol. La carne se mezcló con la arena de mar con ayuda de la varilla de vidrio y alcohol de 95 °. De esta manera, se logró disgregar en su totalidad la muestra. A continuación, los crisoles fueron introducidos en una estufa (KBF 115, Binder, Germany) a 105

°C y se mantuvieron dentro hasta alcanzar un peso constante, para lo cual se requirieron 24 horas.

Para la determinación del contenido en NaCl de las muestras de carne, se colocaron 5 g de muestra en 100 mL de agua destilada y se homogeneizó a 9500 r.p.m. durante 5 minutos (Ultra-turrax T25, IKA Labortechnik, Germany). El contenido de Cl⁻ de la muestra filtrada se determinó por triplicado (Chloride Meter 926 L, Ciba Corning, U. K.) (Cárcel et al., 2007).

Todos los resultados obtenidos se expresaron como % b.h., es decir, kg NaCl o agua/100 kg de muestra. Las determinaciones de humedad y NaCl se determinaron por triplicado para cada una de las muestras.

Descripción del sistema ultrasónico

Las medidas ultrasónicas se realizaron dentro de una cámara frigorífica con temperatura controlada utilizando un sistema de excitación de transductores ultrasónicos y uno de digitalización de la señal. Además, se utilizó un dispositivo de medida del espesor de las muestras. A continuación se describen los distintos elementos que conforman el sistema ultrasónico de medida y su funcionamiento (figura 1):

-Generador-receptor: (Panametrics, Model 5058PR, U.S.A.) ajustado con los siguientes parámetros: amplitud del pulso de excitación del transductor de 100 V, frecuencia de repetición de 100 Hz, ganancia del generador de 20 dB y se aplicó un filtro para la eliminación de las bajas frecuencias en la señal de 0.3 MHz. Este equipo realiza dos funciones, por una parte, el generador proporciona el pulso eléctrico (frecuencia, amplitud y duración) al transductor. Y por otra, el receptor, amplifica y acondiciona (filtra) la señal proveniente del transductor receptor (Mulet et al., 1999a) para posteriormente enviarla a un osciloscopio-PC.

-Transductores: (A314S-SU model, Panametrics, U.S.A.). Dispositivos piezoeléctricos de frecuencia central de 1 MHz de banda estrecha, con un diámetro del cristal de 0.75" de inmersión focalizado y conector UHF con tipo de onda longitudinal. Los transductores se excitan (vibran) por el pulso eléctrico enviado por el generador y transmiten esas vibraciones en forma de ondas ultrasónicas a través de las muestras que se encuentran en contacto con ellos (Mulet et al., 2002). Después, la onda se capta por el transductor receptor que la convierte en un impulso eléctrico para enviarla al generador-receptor.

-Dispositivo de medida del espesor de la muestra: Este dispositivo está formado por una plataforma en la que descansa el transductor receptor y en la cual se colocaban las muestras. A un lado de la plataforma se colocó un brazo metálico perpendicular, por el cual, se desplaza un carro deslizante accionado por un tornillo sin fin unido a un motor unipolar de 4 fases (RS 440-458, Taiwan). En el carro deslizante se colocó el transductor emisor, de este modo se podían realizar medidas de muestras de diferente espesor. Al carro deslizante se le acopló una célula de carga (TPF-1G, Transdutech, Spain) de 40 kg de fuerza máxima unida a un controlador de presión (K3NV, OMRON, Japan). De esta manera, se puede controlar y mantener constante la presión ejercida por los transductores sobre la muestra durante la medida.

El controlador de presión se encuentra unido a un PLC (EC-28HRP, Hitachi, Japan) programado para detener el motor paso a paso una vez se alcance la presión deseada sobre la muestra. La posición del carro deslizante durante la medida se mide con un dispositivo “encoder” (BHK 06.24K500-B6-5, Baumer electric, Switzerland) conectado al osciloscopio-PC por medio de la interfaz RS232. Este dispositivo permite una lectura máxima de 27 cm de altura y tiene una precisión de 0.01 mm, garantizando que los transductores se alinean entre ellos y se mantengan perpendiculares sobre la muestra, ejerciendo una presión constante. Todo el dispositivo de medida se encuentra dentro de una cámara frigorífica (Arco SP 350, Comersa, Spain) para asegurar una temperatura de análisis constante.

-Osciloscopio-PC: (Tektronix, TDS5034, Digital phosphor oscilloscope. Tektronix inc. Bearverton, U.S.A.). El osciloscopio convierte la señal eléctrica continua del generador-receptor en una serie de puntos discretos a través de los cuales se puede reconstruir la señal ultrasónica original. La velocidad de adquisición fue de 250 Mmuestras/s con un total de 2500 puntos adquiridos. El osciloscopio está integrado en un ordenador, donde se desarrolló un software específico con Visual Basic para la adquisición y tratamiento de los datos obtenidos a partir de las señales ultrasónicas.

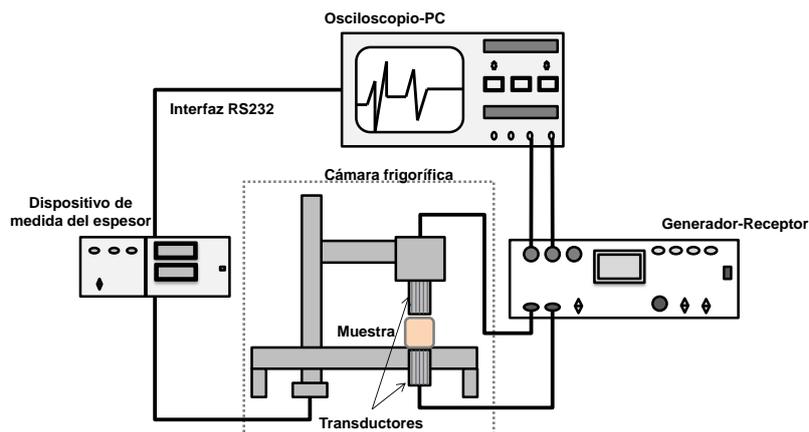


FIGURA 1. Sistema de medida de ultrasonidos.

La velocidad ultrasónica se calculó determinando el espesor de la muestra y el tiempo de vuelo (tiempo que tarda la onda ultrasónica en atravesar la muestra). Durante la medida de velocidad de los ultrasonidos, la muestra estuvo en el interior de un cilindro de cobre con las dos bases abiertas y en contacto con los transductores. Las medidas se realizaron por triplicado a 2 °C en el eje axial de todas las muestras.

Metodología experimental

SALADO DE CILINDROS DE CARNE

Las muestras cilíndricas de *Biceps Femoris* (37 mm de diámetro y 60±10 mm de altura), se introdujeron en cilindros metálicos (acero inoxidable) y se colocaron en una salmuera de NaCl (20 % p/p) a 2 °C que se mantuvo en

agitación continua. Únicamente se sumergió en la salmuera una de las caras del cilindro, mientras que la otra se cubrió con film plástico y adhesivo para evitar su secado en contacto con el aire. Así, desde un punto de vista teórico, se puede asumir que los cilindros de carne se comportan como una lámina infinita ($L= 60\pm 10$ mm) y la transferencia de materia es unidimensional. Se evaluaron 4 tiempos de salado (24, 48, 96 y 168 h) extrayendo de la salmuera 3 cilindros para cada tiempo, a los que se midió la velocidad ultrasónica. Posteriormente, cada uno de los cilindros se dividió en 3 secciones de 20 ± 3 mm de espesor, midiéndose de nuevo la velocidad ultrasónica en cada sección. A continuación, se determinó la concentración de sal y humedad en cada una de las secciones.

MUESTRAS MODELO CON CONCENTRACIÓN DE SAL Y HUMEDAD CONOCIDA

Por otra parte, se prepararon muestras modelo de concentración de sal y humedad conocidas, a partir de *Biceps Femoris* triturado.

Con el objetivo de determinar la influencia de la humedad en la velocidad ultrasónica, se prepararon tres lotes de muestras diferentes: carne fresca (CF) y carne con 2 y 4 % NaCl b.h. Para obtener estas últimas muestras se añadió la cantidad correspondiente de NaCl (99 %) a la carne fresca hasta alcanzar el contenido de 2 y 4 % NaCl b.h. Cada lote se dividió en 7 partes que se hidrataron o deshidrataron hasta conseguir muestras con un rango de humedad del 71 al 77 % agua b.h. (TABLA 1). Se hidrató añadiendo la cantidad oportuna de agua destilada y se deshidrató colocando las muestras en una estufa a vacío a 40 °C (KBF 115, Binder, Germany) el tiempo preciso hasta que se perdiera la cantidad de agua necesaria. Con el objetivo de evitar al máximo la desnaturalización de las proteínas y por lo tanto la pérdida de integridad de la muestra de carne, se aplicó y ajustó la temperatura y el tiempo para que las muestras se deshidratasen hasta el nivel deseado. Una vez preparadas las 7 muestras por lote, se introdujeron en cilindros de cobre y se aplicó vacío (VAC-10, Edesa, Spain). El vacío permite eliminar el aire ocluido que afectaría a las medidas de los ultrasonidos en la muestra. Finalmente, se midió la velocidad ultrasónica a 2 °C por triplicado en cada una de las muestras.

TABLA 1. Diseño experimental. Influencia del contenido de humedad en la velocidad ultrasónica para muestras de carne fresca (CF) y con 2 y 4 % de NaCl b.h.

X_w \ X_s	71	72	73	74	75	76	77
CF							
2							
4							

X_w : % agua b.h.
 X_s : % NaCl b.h.
 CF: carne fresca

Por otro lado, para determinar la influencia del contenido de sal en la velocidad ultrasónica, se prepararon muestras de carne triturada con un contenido en agua del 71, 74 y 77 % b.h. Para ello, la carne fresca se hidrató o deshidrató siguiendo el mismo procedimiento experimental ya comentado. A continuación, cada lote se dividió en 5 partes, uno de carne fresca (CF) y al resto se le añadió respectivamente un 1, 2, 3 y 4 % NaCl b.h. (Tabla 2) y se introdujo en cilindros de cobre, procediendo tal y como se ha comentado anteriormente para la medida de la velocidad ultrasónica.

TABLA 2. Diseño experimental. Influencia del contenido en sal en la velocidad ultrasónica para muestras de carne al 71, 74 y 77 % agua b.h.

$X_w \backslash X_s$	CF	1	2	3	4
71					
74					
77					

X_w : % agua b.h.
 X_s : % NaCl b.h.
 CF: carne fresca

Análisis estadístico

Con ayuda del software estadístico Statgraphics Plus 5.1, se realizaron ANOVA simples y multifactorial ($p < 0.05$) para determinar la influencia del contenido en sal y agua en la velocidad de los ultrasonidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Monitorización del proceso de salado de carne en salmuera

CAMBIOS COMPOSICIONALES

En la figura 2 se muestra la evolución de la humedad (X_w) y la sal (X_s) en los cilindros de *Biceps Femoris* durante el salado. Se puede apreciar que durante la etapa de salado se producen dos transferencias de materia opuestas, por una parte, hay una entrada de sal y por otra, una salida de agua en las muestras (Ventanas, 2001). La ganancia de sal se debe a la diferencia de potencial químico de NaCl existentes entre la carne y la salmuera. Así, en las muestras de carne fresca la fracción másica de sal es prácticamente despreciable frente a la concentración de la salmuera (20 %, p/p). En esta diferencia radica la fuerza impulsora del transporte de sal entre la salmuera y la carne. La salida de agua de la muestra se debe a los procesos osmóticos que tienen lugar para equilibrar concentraciones entre los dos medios. Los flujos de materia entre la muestra y la salmuera disminuyen a medida que se alcanza el equilibrio. Tal y como se muestra en

la figura 2; para alcanzar el equilibrio, tanto en el contenido en sal, como en el de agua, se necesitan más de 168 horas en este tipo de muestras.

En la figura 2 se observa una gran variabilidad experimental como consecuencia de la heterogeneidad de la carne fresca y también debida al propio proceso de salado. En los cilindros enteros, el contenido de agua disminuyó desde 76.3 ± 3.7 a 72.3 ± 7.8 % b.h. y el contenido en sal aumentó desde 0.096 ± 0.030 a 3.717 ± 0.818 % NaCl b.h. Así, durante el proceso de salado, la carne sufrió una pequeña disminución de peso debido a que hay una mayor pérdida de agua que ganancia de sal. Los procesos de salado son comunes tanto en los productos cárnicos crudo-curados tipo jamón, lomo y panceta, como en los productos pesqueros, tipo bacalao, mojama y sardinas (Andrés, 2003) y en productos salados lácteos, como el queso (Benedito, 1997).

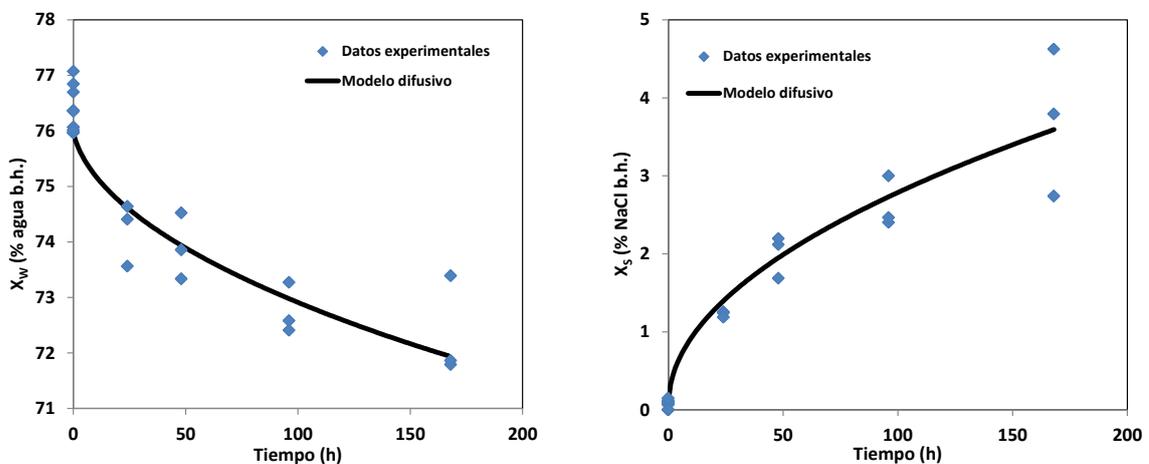


FIGURA 2. Evolución de la humedad (X_w) y la concentración de sal (X_s) en cilindros enteros (37 mm de diámetro y 60 ± 10 mm de altura) de *Biceps Femoris* (BF) durante el salado a 2 °C y modelo difusional aplicado a una geometría de lámina infinita.

La transferencia de agua y sal se modelizó mediante ecuaciones difusionales basadas en la segunda ley de Fick (Crack, 1975) para una geometría de lámina infinita ($L=60 \pm 10$ mm). Como se observa en la figura 2, el ajuste del modelo difusivo a los datos experimentales fue bueno en ambos casos, obteniéndose, en el caso del agua una varianza explicada del 0.903 y en el caso de la sal del 0.945. Por lo tanto, el modelo difusivo fue apropiado para describir el transporte de NaCl y agua en las muestras estudiadas. Las difusividades estimadas fueron 1.60×10^{-9} m^2/s para la transferencia del agua y 4.38×10^{-10} m^2/s para la transferencia de la sal. Los valores de difusividad efectiva obtenidos para el caso de la sal y agua son del orden de magnitud de los determinados anteriormente en la bibliografía. Así, Siró et al., (2008) identificó una difusividad para la sal de 4.00×10^{-10} m^2/s durante el salado (20%, p/p) a 5 °C para el músculo *Longissimus dorsi*. Costa et al., (2010) obtuvo una difusividad para la sal de 3.18×10^{-10} m^2/s para muestras

de *Biceps Femoris* saladas en salmuera de 20 % (p/p). Barat et al (2011) encontró difusividades medias de $6.17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para la sal y de $1.18 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para el agua durante el salado de carne de cerdo a 4 °C con una salmuera del 15 % (p/p). La difusividad efectiva del agua es un orden de magnitud superior a la de la sal, es decir, el agua se difunde más rápidamente que la sal. Este hecho se debe a que las moléculas de agua tienen una masa molecular ($M_r=18$) tres veces más pequeña que las moléculas de NaCl ($M_r=58.4$) (Mathews et al., 2002).

En la sección del cilindro de carne en contacto con la salmuera (figura 3) los cambios de composición fueron más importantes, alcanzándose pérdidas de humedad de hasta el 8 % agua b.h. y ganancias de sal del 12 % NaCl b.h. Este comportamiento es común durante el proceso de salado de los jamones, donde los músculos más superficiales y en contacto con la salmuera, como el *Semimembranosus*, pierden más agua y ganan más sal que los músculos más internos, como el *Biceps Femoris* (Larrea et al., 2007). Se puede apreciar en la figura 3 que en la sección en contacto con la salmuera, la humedad en la muestra ha alcanzado prácticamente el equilibrio tras 168 horas de salado, siendo su valor de 68.8 ± 0.5 % agua b.h.

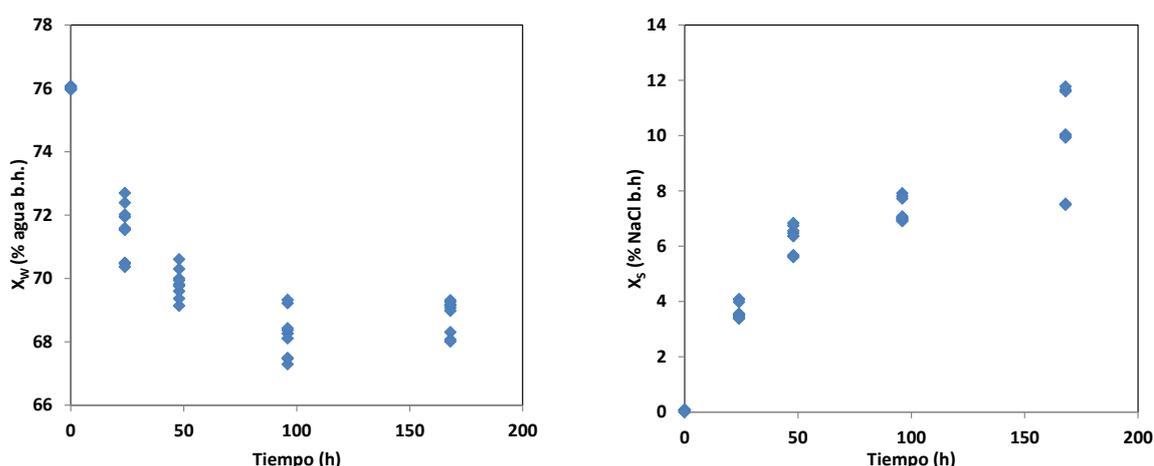


FIGURA 3. Evolución de la humedad (X_w) y la concentración de sal (X_s) de la sección en contacto con la salmuera (37 mm de diámetro y 20 ± 3 mm de altura) de los cilindros de *Biceps Femoris* (BF) durante el salado a 2 °C.

CAMBIOS EN LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA

Se realizaron medidas de velocidad ultrasónica transcurrido el tiempo de salado (24, 48, 96 y 168 h) tanto en los cilindros enteros como en las tres secciones en las que se dividió cada cilindro. Como se observa en la figura 4 la velocidad aumentó con el tiempo de salado. Como ya se ha comentado, a medida que transcurre el salado, la muestra pierde agua y gana sal, lo que conlleva un aumento de sólidos en la fase líquida que se traduce en un aumento en la velocidad de los ultrasonidos. Resultados similares se obtuvieron durante la maduración de quesos tipo Cheddar y Mahón, en el que la velocidad se incrementó a medida que los quesos perdían agua e

incrementan la proporción de otros sólidos, tales como sales y proteínas (Benedito, 1998). Niñosles (2007), también estudió los cambios de la velocidad de los ultrasonidos durante el curado de jamones, concluyendo que la velocidad de los ultrasonidos se incrementó a medida que los jamones pierden agua y aumentan su dureza durante el proceso de curado. Por otra parte, la gran dispersión en las medidas de velocidad de los ultrasonidos tras 168 horas de salado, se debe al diferente comportamiento de las muestras durante el proceso de salado.

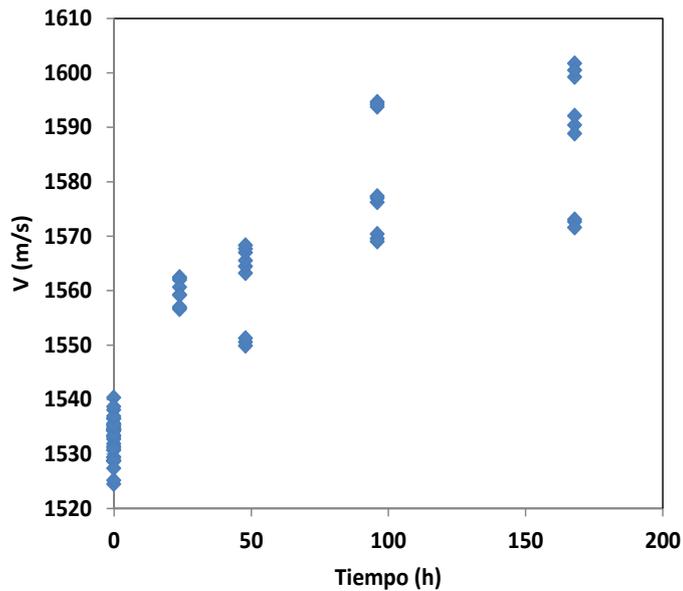


FIGURA 4. Evolución de la velocidad de los ultrasonidos en cilindros enteros (37 mm de diámetro y 60 ± 10 mm de altura) de *Biceps Femoris* (BF) durante el salado a 2 °C.

En la figura 4, se puede apreciar que al finalizar el proceso de salado (168 h) se llegaron a obtener valores de velocidad en los cilindros enteros de hasta 1600 m/s. Este aumento de velocidad fue más acusado en la sección de la muestra en contacto con la salmuera (figura 5), donde se alcanzaron valores de velocidad ultrasonica de hasta de 1700 m/s. Como se observa en la figura 3, la sección en contacto con la salmuera absorbió mayor cantidad de sal y perdió más agua, por lo que la concentración de solutos en la fase líquida era mayor que en las otras dos secciones, lo que se traduce en una mayor velocidad de los ultrasonidos.

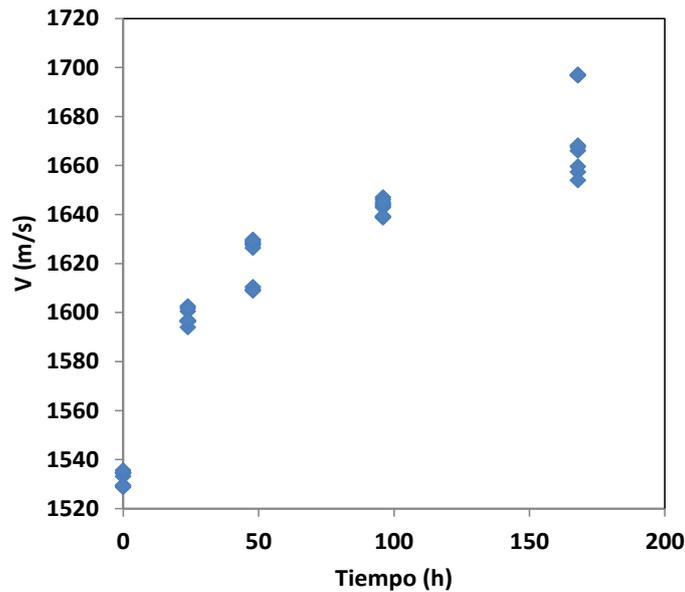


FIGURA 5. Evolución de la velocidad de los ultrasonidos en la sección (37 mm de diámetro y 20 ± 5 mm de altura) de *Biceps Femoris* (BF) en contacto con la salmuera durante el salado a 2 °C.

En la figura 6 se relaciona la velocidad de los ultrasonidos con el contenido en sal y agua de todas las secciones de los cilindros durante el salado. El aumento del contenido en sal y disminución de contenido en agua de las muestras durante el salado conllevan un aumento de la velocidad de los ultrasonidos. Tal y como se muestra en la figura 6, se obtuvieron relaciones lineales significativas ($p < 0.05$) entre la composición y la velocidad de los ultrasonidos, obteniéndose un coeficiente de regresión más alto para la sal (0.975) que para la humedad (0.863).

Se realizó un análisis regresión múltiple considerando como variable independiente a la velocidad de los ultrasonidos y como factores la concentración de sal y la humedad. El análisis estadístico mostró que la relación lineal de ambas variables con la velocidad de los ultrasonidos es significativa ($p < 0.05$), pero advirtió la presencia de multicolinealidad severa entre ambas variables. Es decir, que existe una correlación directa entre concentración de sal y humedad. Obviamente este resultado es consecuencia del fenómeno que se está analizando, ya que el salado lleva como fenómenos acoplados la salida de agua y la ganancia de sal. En función de estos resultados, fue necesario separar la influencia de la humedad y contenido de sal de las muestras de *Biceps Femoris* sobre la velocidad de los ultrasonidos.

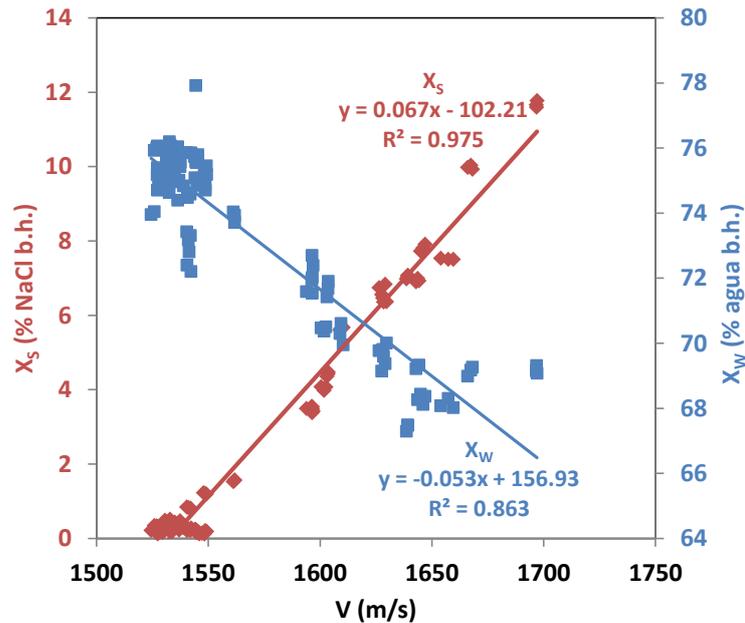


FIGURA 6. Relación entre velocidad de los ultrasonidos con la humedad (X_w) y concentración de sal (X_s) para todas las secciones de cilindros de *Biceps Femoris* (BF).

Influencia de la concentración de sal y agua sobre la velocidad de los ultrasonidos

A continuación se presentan los resultados del plan experimental en el que se prepararon muestras modelo con concentraciones de sal y agua conocidas, con el objetivo de diferenciar el efecto de cada una de ellas sobre la velocidad de los ultrasonidos. Como se observa en la figura 7, la velocidad de los ultrasonidos aumentó con el incremento del contenido en sal de las muestras para todo el rango experimental estudiado (0 a 4 % NaCl b.h.). Este hecho se dio por igual para los tres lotes de humedades estudiadas. Se obtuvieron relaciones lineales significativas ($p < 0.05$) entre el contenido de sal y la velocidad para los tres lotes de muestras de diferente humedad, con coeficientes de regresión elevados, desde el 0.978 a 0.999. El mejor ajuste ($R^2 = 0.999$) y la menor variabilidad entre las repeticiones se obtuvo para las muestras con un contenido inicial del 77 % agua b.h., posiblemente debido a que al hidratar la carne las sales se disuelven mejor y se obtiene muestras más homogéneas. Las pendientes de las relaciones lineales de la figura 7 muestran el cambio de velocidad ultrasónica con el contenido de sal. Esto significa que, por ejemplo, un cambio del 1 % en el contenido en sal conlleva un aumento de 15.1 ± 2.2 m/s en la velocidad de los ultrasonidos, para las muestras de carne con un 71 % agua b.h. Además, no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tres lotes estudiados, obteniéndose valores entre 14.8 ± 0.6 y 16.2 ± 2.0 m/s % NaCl b.h. La figura 7 también muestra la ecuación experimental de Kinsler (ecuación 1), que representa la influencia del contenido en sal sobre la velocidad de los ultrasonidos en la disolución salina (Kinsler, 1982). Como se observa, pese a la diferente estructura de la carne y la disolución de agua, las pendientes son

similares. Así, el hecho que las pendientes para carne con diferente humedad y para una disolución salina sean similares, permite afirmar que sin importar el tipo de muestra utilizada, un incremento en el contenido en sal conlleva un aumento similar de la velocidad de los ultrasonidos.

$$V = 1449 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3 + (1.39 - 0.012T)(C - 35) \quad (1)$$

Donde: V = velocidad (m/s); T =temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y C = concentración de sal (kg sal/100 kg muestra).

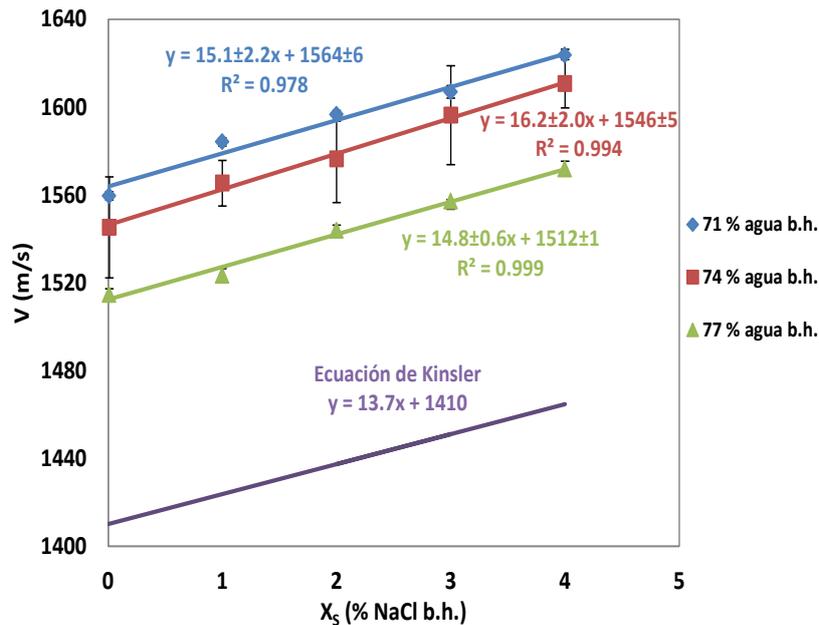


FIGURA 7. Efecto del contenido en sal sobre la velocidad ultrasónica en tres lotes de muestras con diferente contenidos de humedad y la ecuación de Kinsler.

En la figura 8 se representa el efecto de la humedad sobre la medida de velocidad de los ultrasonidos. Tal y como era esperado, las muestras mostraron un descenso en la velocidad ultrasónica con el incremento del contenido de agua. Este hecho se observa por igual en los tres lotes de muestras de *Biceps Femoris* estudiadas: carne fresca (CF) y carne con 2 y 4 % NaCl b.h. Al igual que en el caso anterior, se obtuvieron relaciones lineales significativas con valores del coeficiente de regresión comprendidos ente 0.964 y 0.992. Similares resultados se obtuvieron para sobrasada, donde la velocidad de ultrasonidos se incrementó a medida que el producto perdía agua (Lull et al., 2002b).

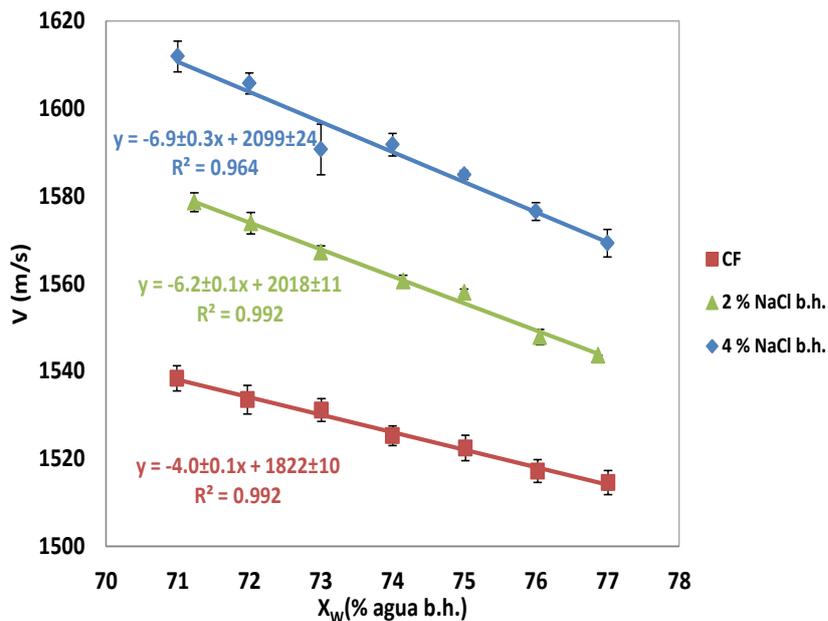


FIGURA 8. Efecto del contenido de humedad sobre la velocidad ultrasónica en tres lotes de muestras con diferentes contenidos salinos.

Si comparamos las figuras 7 y 8, observamos que las pendientes obtenidas en la relación entre la velocidad ultrasónica y la concentración de sal son superiores (15.4 ± 0.7) a la obtenida para el contenido en humedad (-5.7 ± 1.5). Así pues, un cambio del 1 % en el contenido de sal conlleva un aumento de 15.4 m/s para la velocidad ultrasónica mientras que un descenso del 1 % del contenido en agua conlleva un aumento de 5.7 m/s en la velocidad ultrasónica. Por lo tanto, se puede afirmar que el componente salino ejerce una mayor influencia sobre la velocidad ultrasónica que el agua, debido a que para un mismo incremento en ambos factores, se produce un mayor cambio de velocidad con el incremento del contenido en sal de la muestra.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos puede concluirse que:

- Durante el proceso de salado las muestras de *Biceps Femoris* cambiaron su composición, concretamente, incrementaron su contenido en sal y disminuyeron su contenido en agua. El modelo difusivo utilizado fue apropiado para describir el transporte de agua y NaCl en las muestras estudiadas, identificándose unos valores de difusividad de $1.60 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para la transferencia del agua y $4.38 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para la transferencia de la sal.

- La velocidad de los ultrasonidos en las muestras de *Biceps Femoris* se vio afectada por el tiempo de salado. La velocidad ultrasónica aumentó con el tiempo de salado debido a que las muestras incrementaron su contenido en sal y disminuyeron el contenido en agua. Este efecto fue más importante

en la sección en contacto con la salmuera, que alcanzó los valores máximos de velocidad ultrasónica.

- Se encontraron relaciones lineales significativas ($p < 0.05$) entre el contenido en sal y agua y la velocidad ultrasónica. El cambio de velocidad ultrasónica en las muestras con la concentración de sal, fue independiente del tipo de muestra analizada. El mismo comportamiento se observó en las muestras con diferente humedad.

- El contenido en sal ejerció una mayor influencia sobre la medida de la velocidad ultrasónica que el agua, debido a que para un mismo incremento porcentual en ambos factores, se produce un mayor cambio de velocidad en el caso del incremento del contenido en sal de la muestra.

- Las medidas de velocidad de ultrasonidos podrían ser útiles para monitorizar el proceso salado de carne de cerdo a nivel industrial de una manera no destructiva.

REFERENCIAS

- Andrés, A. 2003. Estudio del Proceso de Salado y Desalado de Bacalao (*Gadus morhua*). Evaluación de Alternativas a los Procesos Tradicionales. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Barat, J.M; Baigts, D.; Aliño, M.; Fernández, Frnc J.; Pérez-García, Víctor M. 2011. Kinetics Studies during NaCl and KCl Pork Meat Brining. *Journal of Food Engineering*, **160**:102-110.
- Bello, J. 2008. Jamón Curado. Aspectos Científicos y Tecnológicos. Perspectivas desde la Unión Europea. Diez de Santos, Spain.
- Benedito, J. 1998. Contribución a la Caracterización de Quesos mediante el Uso de Ultrasonidos de Señal. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Benedito, J.; Cárcel, J. A.; Gisbert, M.; Mulet, A. 2001. Quality Control of Cheese Maturation and Defects Using Ultrasonics. *Journal Food Engineering and Physical Properties*, **1**:100-104.
- Cárcel, J. A.; Benedito, J.; Bon, J.; Mulet, A. 2007. High Intensity Ultrasound Effects on Meat Brining. *Meat Science*, **76**: 611-619.
- Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion. Oxford University Press. Londres. Reino Unido.
- Costa-Corredor, A.; Muñoz, I.; Arnau, J.; Gou P. 2010. Ion Uptakes and Diffusivities in Pork Meat Brine-salted with NaCl and K-lactate. *Food Science and Technology*, **43(8)**:1226-1233
- Kinsler, L.E.; Frey, A.R.; Coppens, A.B.; Sanders, J.V. 1982. Fundamentals of Acoustics. John Wiley and Sons. New York
- Larrea, V. 2003. Caracterización Química y Microestructural del Jamón Curado Denominación de Origen de Teruel. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Larrea, V; Pérez-Munuera, I.; Hernando, I.; Quiles, A.; Lluch, M.A. 2007. Chemical and Structural Changes in Lipids during the Ripening of Teruel Dry-cured Ham. *Food Chemistry*. **102**: 494-503.
- Llull, P.; Simal, S.; Femenia, A.; Benedito, J.; Rosselló, C. 2002a. The Use of Ultrasound Velocity Measurement to Evaluate the Textural Properties of Sobrassada from Mallorca. *Journal of Food Engineering*, **52**:323-330.
- Llull, P.; Simal, S.; Benedito, J.; Rosselló, C. 2002b. Evaluation of Textural Properties of a Meat-based Product (sobrassada) Using Ultrasonic Techniques. *Journal of Food Engineering*, **53**:279-285.
- Mathews, C; Van Holde, E.; Ahern, K. 2002. Bioquímica 3ª edición. Pearson Education. Madrid

- Mulet, A.; Benedito, J.; Bon, J.; Sanjuan, N. 1999a. Low Intensity Ultrasonics in Food Technology. *Food Science Technology International*, **5**:285-297.
- Mulet, A.; Benedito, J.; Bon, J.; Rosselló, C. 1999b. Ultrasonic Velocity in Cheddar Cheese as Affected by Temperature. *Journal of Food Science*, **64**:1038-1041.
- Mulet, A.; Benedito, J.; Golás, Y.; Cárcel, J. A. 2002. Noninvasive Ultrasonic Measurements in the Food Industry. *Food Reviews International*, **18**:123-133.
- Niñoles, L. 2007. 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. 2007. Quality Assessment of Iberian Pigs through Bacfat Ultrasound Characterization and Fatty Acid Composition. *Meat Science*, **76**:102-111.
- 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.
- Siró, I.; Vén, Cs.; Balla, Cs.; Jónás, G.; Zeke, I.; Friedrich, L. (2008). Application of an Ultrasonic Assisted Curing Technique for Improving the Diffusion of Sodium Chloride in Porcine Meat. *Journal of Food Science*, **91**:363-362.
- Ventanas, J. 2001. Tecnología del Jamón Ibérico. De los Sistemas Tradicionales a la Explotación Racional del Sabor y Aroma. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Whittaker, A. D.; Park, B.; Thane, B. R.; Miller, R. K.; Savell, J. W. 1992. Principles of Ultrasound and Measurement of Intramuscular Fat. *Journal of Animal Science*, **70**:942-952.
- Zumalacárregui, J.M^a. 1997. Tecnología del Jamón Crudo-curado. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, **1 (5)**:134-138.