

Aplicación de la Imagen de Resonancia Magnética (IRM) al análisis morfológico no destructivo de piezas cárnicas. Una aproximación a la selección de perniles

Víctor Remiro^{1,*}, María Isabel Cambero¹, María Isabel García-Real²,
María Dolores Romero de Ávila¹, David Castejón³, Carlos Santos¹ y
María Encarnación Fernández-Valle³

¹ Sección Departamental Farmacia Galénica y Tecnología Alimentaria. Facultad de Veterinaria. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, España.

² Departamento de Medicina y Cirugía Animal. Facultad de Veterinaria. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, España.

³ ICTS Bioimagen Complutense. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, España.

Resumen

Para determinar el potencial de aplicación de la imagen de resonancia magnética (IRM) en la evaluación de la aptitud tecnológica de perniles frescos a nivel industrial se han obtenido imágenes de resonancia magnética potenciadas en T_1 , T_2 , T_2^* y densidad protónica (DP). Con este objetivo, se analizaron perniles frescos de cerdo blanco clasificados en cuatro categorías en función de su contenido graso. En cada pieza se determinó, utilizando imágenes en el plano axial potenciadas en DP, el espesor de la grasa subcutánea (GS) sobre los músculos *rectus femoris* (RF), *vastus lateralis*, *biceps femoris* y *semitendinosus* (ST) a nivel de la longitud media del fémur. Además, se estimó el valor promedio del espesor de la GS en zonas seleccionadas (SL) entre los músculos RF y ST. Se ha establecido una correlación lineal ($R^2 = 0,85$; $p < 0,05$) entre el espesor promedio de la GS en las zonas SL y el contenido graso total del pernil. El análisis mediante IRM del interior de las piezas permitió la detección de defectos internos como hemorragias y acúmulos de sangre, lesiones articulares y óseas, anomalías del ganglio poplíteo y desgarros musculares, que posteriormente fueron contrastadas mediante la disección de las piezas. Muchas de estas lesiones tienen una importante repercusión en la aparición de defectos en jamón curado. Se concluye que la IRM, como técnica no destructiva, es una herramienta adecuada para la detección de defectos internos en piezas íntegras, así como para la estimación del contenido total de grasa del pernil.

Palabras clave: IRM, daños estructurales, grasa subcutánea, detección de lesiones.

Application of Magnetic Resonance Imaging (MRI) to non-destructive morphological analysis of meat pieces. An approach to the selection of pork legs

Abstract

In order to determine the potential application of magnetic resonance imaging (MRI) in the evaluation of the technological aptitude of fresh pork legs at industrial level, T_1 , T_2 , T_2^* and proton density (PD)

* Autor para correspondencia: vremiro@ucm.es

Cita del artículo: Remiro V., Cambero M.I., García-Real M.I., Romero de Ávila M.D., Castejón D., Santos C., Fernández-Valle M.E. (en prensa). Aplicación de la Imagen de Resonancia Magnética (IRM) al análisis morfológico no destructivo de piezas cárnicas. Una aproximación a la selección de perniles. ITEA-Información Técnica Económica Agraria. Vol. xx: 1-15. <https://doi.org/10.12706/itea.2023.018>



weighted magnetic resonance images were obtained. For this purpose, fresh white pork legs classified into four categories according to their fat content were analyzed. In each piece, the thickness of the subcutaneous fat (GS) over the *rectus femoris* (RF), *vastus lateralis*, *biceps femoris* and *semitendinosus* (ST) muscles at the level of the mid-femur length was determined using PD weighted axial images. In addition, the average value of GS thickness in selected areas (SL) between RF and ST muscles was estimated. A linear correlation ($R^2 = 0.85$; $p < 0.05$) was established between the average GS thickness in SL zones and the total fat content of the pork leg. MRI analysis of the interior of the pieces allowed the detection of internal defects such as hemorrhages and blood accumulations, joint and bone lesions, popliteal ganglion anomalies and muscle tears, which were subsequently contrasted by dissection of the pieces. Many of these lesions have an important repercussion on the appearance of defects in cured ham. It is concluded that MRI, as a non-destructive technique, is a suitable tool for detecting internal defects in whole pieces, as well as for estimating the total fat content of the ham.

Keywords: MRI, structural damage, subcutaneous fat, injuries detection.

Introducción

La industria cárnica es una de las más importantes dentro del sector agroalimentario en España, siendo la que presenta un mayor porcentaje de cifra de negocios, con un 24,6 % del total, lo cual supone alrededor de 31.032 millones de euros (MAPA, 2022). Dentro de esta industria, los elaborados cárnicos tienen un elevado impacto en la economía, siendo el jamón y la paleta curados los productos con los valores más altos de producción en España, llegando a alcanzar en el último año, valores de 308.000 t, y en términos de exportación, las 67.196 t (ANICE, 2022).

En productos como el jamón curado, en los que el proceso de elaboración se prolonga en el tiempo (en ocasiones, periodos de maduración de más de 12 meses), es especialmente importante asegurar la calidad del producto final. Para ello, se requiere disponer de metodologías que faciliten la selección de las piezas cárnicas frescas con particularidades (como pH y contenido graso) que garanticen un correcto desarrollo de las características sensoriales y que permitan establecer lotes homogéneos. Entre los factores habituales de control, se encuentra el pH final de las piezas cárnicas, por su relevancia en la seguridad, características sensoriales y

aptitud tecnológica. Como es sabido, valores de pH superior a 6,0-6,2 (característicos de las carnes DFD, *Dry Firm and Dark*) conllevan un mayor riesgo microbiológico y reducen la difusión del agua, mientras que valores de pH inferior a 5,6 (carnes sospechosas de comportamiento PSE, *Pale, Soft and Exudative*) favorecen la penetración de la sal y la pérdida de agua (Bosse et al., 2018). Dada su importancia, el pH es uno de los factores más controlados en la industria cárnica. Otro factor a tener en cuenta en la elaboración de productos curados es el peso total de la pieza en fresco (Lebret y andek-Potokar, 2022). Este factor condiciona el tiempo requerido para el salado y la velocidad de deshidratación, así como los procesos de maduración.

El contenido de tejido adiposo del pernil es también un parámetro a considerar en la selección de las piezas destinadas a la producción de jamón curado. Este tejido, tiene una gran relevancia en el desarrollo aromático y sávido del producto final, debido sobre todo a la lipólisis y a la oxidación de sus componentes (Segura et al., 2015). Una gran parte del tejido adiposo del jamón curado corresponde a la grasa subcutánea (GS). Este acúmulo de grasa dificulta la difusión del agua y la penetración de la sal. Por tanto, un mayor espesor de la GS evita la deshidratación rápida

y excesiva, con la consiguiente reducción de las pérdidas de peso a lo largo del proceso de curado. Además, la migración de la sal a través de la fracción magra se ve condicionada tanto por el contenido de GS como por el mayor porcentaje de grasa total de la pieza (Čandek-Potokar y Škrlep, 2012; Segura et al., 2015; Bonfatti y Carnier, 2020). Para la estimación del contenido de grasa de piezas cárnicas íntegras, habitualmente se utilizan métodos que requieren una toma de muestra o medidas aproximadas del espesor de la GS. Estos métodos son laboriosos y en la mayoría de los casos destructivos, pudiendo producir alteraciones en las piezas y su depreciación (Pérez-Palacios et al., 2014; Antequera et al., 2021).

Por otra parte, existen considerables dificultades para analizar la morfología y el estado del interior de las piezas cárnicas, pese a que con frecuencia se presentan lesiones derivadas del manejo de los animales. Muchas de las alteraciones que pueden producirse a nivel óseo y de tejido muscular tienen una fuerte repercusión en la conservación y en el proceso de curado, con afectación de la calidad sensorial del producto final y las consecuentes pérdidas económicas (Čandek-Potokar y Škrlep, 2012). Entre los hallazgos más frecuentes se encuentran fracturas óseas, luxaciones, inflamaciones y roturas de fascias articulares, hipertrofia de ganglios, daños en el sistema vascular (sangre en los vasos, hematomas, equimosis o petequias, presencia de sangre) y abscesos.

En este contexto, tanto para la estimación del contenido graso, como para la detección de alteraciones y lesiones, la industria cárnica recurre a distintas técnicas no destructivas o mínimamente invasivas (Pérez-Santaescolástica et al., 2019), como las basadas en el uso de ultrasonidos (Contreras et al., 2021), la espectroscopía de infrarrojo cercano (Kademi et al., 2019), la imagen hiperespectral (Gou et al., 2013), o el empleo de rayos X, entre las que se encuentra también la tomografía

computerizada (de Prados et al., 2015) y las recientes técnicas de absorciometría de rayos X de energía dual (Dual-energy X-ray absorptiometry, DXa) (Leighton et al., 2022).

Otras metodologías que podrían utilizarse en el análisis de piezas íntegras serían las basadas en la resonancia magnética nuclear (RMN), entre las que se encuentra la Imagen de Resonancia Magnética (IRM). Se trata de una técnica, no invasiva, que no requiere contacto con la pieza a analizar y no utiliza radiación ionizante. La IRM posibilita la obtención de imágenes con diferentes contrastes dependiendo de distintos parámetros característicos, como son los tiempos de relajación longitudinal (T_1) y transversal (T_2 , T_2^*) o la densidad protónica (DP), que dependerán de las propiedades que tenga cada tejido de la muestra estudiada (Mitchell et al., 2001). Estas imágenes permiten observar la estructura interna de sistemas biológicos, diferenciando tejidos y estructuras. Además, esta técnica permite la monitorización de los cambios estructurales asociados a procesos de degradación, de maduración, de transformación o de conservación (Damez y Clerjon, 2008). En conjunto, es una herramienta válida para la clasificación y la determinación de la calidad de los alimentos.

Aunque esta metodología se ha utilizado fundamentalmente en el diagnóstico médico, su potencial para la industria alimentaria es también muy elevado. No obstante, su implantación en el sector industrial ha estado condicionada por el elevado coste económico de los equipos y la carencia de estudios para adaptarlos a líneas de procesado en continuo. Sin embargo, en los últimos años el diseño de equipos de bajo campo magnético mucho más económicos, el desarrollo de nuevas secuencias y la mejora tecnológica de los equipos permiten actualmente, obtener imágenes en tiempos del orden de segundos o incluso milisegundos (Uecker et al., 2010). Todo ello, abre la posibilidad de su incorpo-

ración a sistemas de producción en el sector agroalimentario.

En esta línea de estudio, se han desarrollado diversos trabajos en los que se ha comprobado la utilidad de las imágenes de resonancia magnética (RM) para detectar lesiones y analizar la morfología de distintos alimentos, especialmente de origen vegetal. Cabe mencionar el uso de la IRM para estimar el efecto de la congelación en naranjas (Barreiro et al., 2008) y en pepinillos (Kotwaliwale et al., 2012), la presencia de semillas en cítricos (Hernández-Sánchez et al., 2005), el oscurecimiento interno de peras (Hernández-Sánchez et al., 2007), así como la presencia de alteraciones en cerezas y en manzanas (Melado-Herreros et al., 2013). A pesar de estos avances, el uso de la IRM en líneas de producción de la industria cárnica está todavía sin desarrollar. No obstante, diversos trabajos de investigación han dejado patente la viabilidad de esta técnica para el análisis de carne y productos cárnicos (Caballero et al., 2021), así como para la monitorización del proceso de maduración de productos cárnicos mediante la evaluación de la difusión de la sal, las pérdidas de peso por deshidratación o los cambios estructurales (García-García et al., 2019; Manzocco et al., 2013).

Por todo esto, el objetivo de este trabajo es estimar el potencial de la IRM para su uso a nivel industrial como herramienta para determinar la adecuación de perniles destinados a la elaboración de jamón curado.

Material y métodos

Materia prima analizada

Para la realización de este estudio, se utilizaron perniles frescos de 24 cerdos blancos (Large White × Landrace × Duroc), suministrados por una empresa cárnica, tras su obtención a las 48 h después del sacrificio del

animal. El pernil derecho de cada animal se destinó a la estimación del contenido graso, mientras que el izquierdo se utilizó para el análisis por IRM. Las distintas determinaciones se realizaron el mismo día de obtención de las piezas o al día siguiente (en las 48 h tras el sacrificio del animal).

Determinación del contenido graso, pH y peso de los perniles

Todos los perniles se pesaron y se determinó su pH en el músculo *semimembranosus* mediante punción con un pHmetro Crison pH25+ (Hash, Loveland, EE. UU). El contenido graso de la totalidad de las piezas se determinó en un equipo de rayos X Multiscan Technologies (Cocentaina, Alicante, España). De forma adicional, el pernil derecho de cada animal se deshuesó después de la ablación de la porción distal a la altura del tarso. El material resultante de este pernil en su totalidad, se utilizó para la obtención de un homogenizado, tras su picado y mezcla, y se empleó para corroborar el contenido en grasa mediante el método Soxhlet (AOAC, 2006). El pernil izquierdo se reservó íntegro para el análisis mediante IRM. El contenido graso, determinado en el equipo de rayos X, se utilizó para la clasificación de los perniles izquierdos para la clasificación en cuatro categorías (magros, contenidos medios de grasa, grasos y muy grasos). Para el estudio se seleccionaron al menos seis piezas de cada categoría.

Análisis mediante IRM

El análisis de IRM de los perniles izquierdo se realizaron en un equipo de resonancia magnética de bajo campo de diseño en C abierto (Panorama 0,23T, Philips Sistemas Médicos, Holanda). Se empleó una antena de cuerpo modelo XL. Los perniles se colocaron de modo que el eje longitudinal del jamón quedó

alineado con el eje mayor de la antena, es decir, a lo largo del ancho de la antena, con la cara lateral de la extremidad en la parte alta de la misma (material complementario, Figura 1M). En todos los casos fue necesario introducir la "pezuña" a través de una de las aperturas laterales de la antena, por superar la longitud de los pernils la anchura de esta. Los pernils fueron estudiados en el plano axial y sagital, obteniéndose imágenes potenciadas en T_1 , T_2 , T_2^* y DP. En primer lugar, se adquirieron imágenes rápidas con orientación coronal, sagital y trasversal para la localización de los experimentos posteriores. Para las imágenes potenciadas en T_1 se emplearon dos secuencias diferentes: Balanced Fast Field Echo 3D (BFFE3D) y Turbo Spin Echo 2D (TSE). En el primer caso el tiempo de repetición (TR) empleado fue de 8,4 ms, el tiempo de eco (TE) de 4,2 ms, el ángulo de excitación (FA) de 45° y el número de experimentos promediados (NA) de 1. En el caso de la secuencia TSE el TR empleado fue de 410 ms, el TE efectivo de 18 ms y NA de 4. Para las imágenes potenciadas en DP y T_2 se empleó una secuencia TSE de doble eco (DTSE) que permite obtener para cada corte imágenes con dos TE diferentes, de modo que la primera imagen obtenida está potenciada en DP y la segunda en el tiempo de relajación transversal T_2 . En este caso se adquirieron imágenes con 10 y 100 ms. Para las imágenes potenciadas en T_2^* se usó una secuencia Fast Field Echo (FFE) con TR de 850 ms, TE de 40 ms, FA de 75° y NA de 1. El tamaño de la región de la imagen (*field of view*, FOV) fue en todos los casos de 45×45 cm² y la anchura de los cortes de 5 mm. Para la secuencia BFFE3D potenciada en T_1 en dirección sagital se realizó un barrido completo del jamón, adquiriéndose 42 cortes en total. Para el resto de secuencias y orientaciones el número de cortes varió entre 12 y 28. La resolución de las imágenes varió dependiendo de la matriz adquirida, de modo que se obtuvieron imágenes de alta resolución (1 mm) en

tiempos de adquisición aproximados de 6 min e imágenes de baja resolución (2,5 mm) y tiempos de adquisición aproximados de 1 min.

Las imágenes obtenidas se analizaron mediante el visor de imágenes Radiant DICOM Viewer 2022.1.1 (Medixant, Poznan, Polonia) y el programa de procesamiento digital de imagen ImageJ 1.54 (NIH, Bethesda, Maryland, EEUU). Como se indica en los siguientes apartados, el análisis de IRM se utilizó para estimar el espesor de la grasa subcutánea y la detección de alteraciones o lesiones internas.

Determinación del espesor de la grasa subcutánea (GS)

El espesor de la GS se determinó con el programa ImageJ a partir de las imágenes de RM axiales potenciadas en DP correspondientes al corte en la longitud media del fémur (considerando esta longitud desde la articulación coxofemoral hasta la articulación de la femorotibial o de la rodilla). Para la medida del espesor de la GS se determinó la distancia entre la superficie de la piel y la superficie muscular en la que se inserta el tejido adiposo, siguiendo una trayectoria lineal perpendicular a las mencionadas superficies. La estimación se realizó en varios puntos sobre los músculos *rectus femoris* (RF), *vastus lateralis* (VL), *biceps femoris* (BF) y *semitendinosus* (ST), considerándose valores individuales y promedios (Figura 1a).

Análisis interno de los pernils. Detección de lesiones en distintos tejidos

Para la detección de lesiones en el conjunto de la masa del pernil, se analizaron en primer lugar las imágenes FFE potenciadas en T_1 de baja resolución adquiridas con el fin de detectar de forma visual zonas con intensidades anómalas en distintos tejidos. Tras este estudio inicial, se usaron las imágenes de mayor resolución adquiridas con diferentes potenciaciones y orientaciones de los pernils para

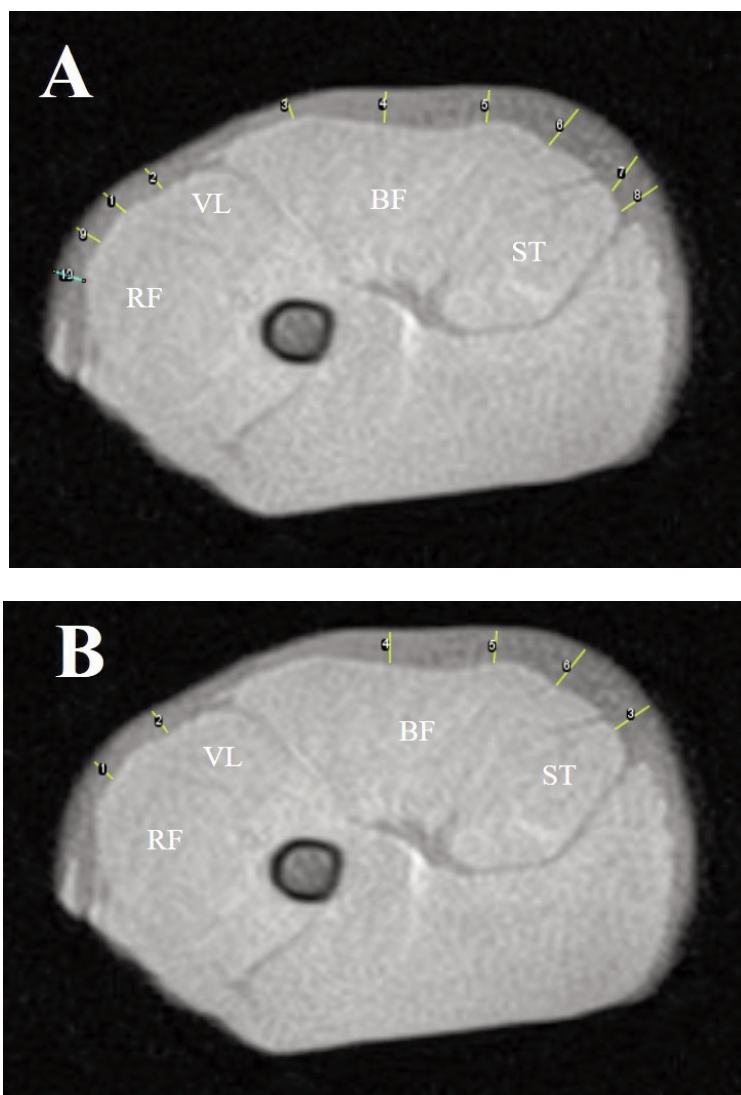


Figura 1. Puntos utilizados para la determinación del espesor de la grasa subcutánea (GS) en distintas zonas del pernil en una imagen de resonancia magnética (RM) en el plano axial potenciada en densidad protónica (DP). (A) Puntos para la estimación del espesor medio de la GS sobre distintos músculos. (B) Puntos considerados para la estimación del espesor de la GS las zonas seleccionadas (SL). RF: *rectus femoris*; VL: *vastus lateralis*; BF: *biceps femoris*; ST: *semitendinosus*.

Figure 1. Points used for the determination of subcutaneous fat (SF) thickness in different areas of the pork leg in an axial proton density (PD) enhanced magnetic resonance (MR) image. (A) Points for the estimation of the mean thickness of SF over different muscles. (B) Points considered for the estimation of the thickness of SF in selected areas (SL). RF: rectus femoris; VL: vastus lateralis; BF: biceps femoris; ST: semitendinosus.

obtener mejor visualización de las zonas susceptibles de alteración. Concluido el estudio de IRM, se realizó una disección de las piezas para analizar visualmente los lugares en los que se detectaron lesiones y confirmar su intensidad y características.

Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de los resultados se llevó a cabo con el programa Statgraphics 19-X64 para Windows (Statistical Graphics Corporation, Rockville, MD, EEUU). Los datos obtenidos se presentaron como medias y desviaciones estándar. Las diferencias entre medias de las variables (pH, contenido graso total obtenido por rayos X, espesor de la GS y peso del pernil) se han establecido mediante ANOVA simple, a través del procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. El análisis de regresión simple se utilizó para relacionar el espesor promedio de GS estimado mediante IRM en distintos puntos y el contenido graso total del pernil. Para un mayor ajuste de esta regresión, se utilizó ANOVA para la selección de los puntos de análisis a considerar para la obtención del valor promedio de GS que se correspondía con

un incremento del coeficiente de correlación (R^2) siguiendo un procedimiento de eliminación gradual. Estas regresiones se evaluaron mediante pruebas estadísticas de Durbin-Watson, al 95 % de nivel de confianza.

Resultados y discusión

Caracterización de los perniles

En la Tabla 1, se muestran valores medios del contenido graso total de los perniles izquierdos de los animales incluidos en el estudio, determinado mediante un equipo de rayos X. Esta misma determinación se realizó en el pernil derecho. Para comprobar la precisión de esta metodología, en un homogenizado del total de la masa de tejidos de esta pieza se determinó el contenido de grasa por el método oficial de Soxhlet. Los valores obtenidos por ambas metodologías en el pernil derecho no difirieron significativamente ($p > 0,05$), por tanto, se consideró el contenido graso total del pernil izquierdo determinado en el equipo de rayos X como representativo de la presencia de este componente en el conjunto de la pieza cárnica.

Tabla 1. Características de los perniles frescos.
Table 1. Characteristics of fresh pork legs.

Categoría asignada	Intervalo de grasa total (%)	Contenido graso total (%)	pH	Peso (Kg)
A	<10	7,75 ± 1,06	5,76 ± 0,07	12,28 ± 0,50
B	>10-16	12,70 ± 1,01	5,82 ± 0,07	12,64 ± 0,52
C	>16-20	17,85 ± 0,35	5,81 ± 0,05	12,73 ± 0,47
D	>20	23,00 ± 1,01	5,72 ± 0,10	12,65 ± 0,50

No se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre valores medios.

Teniendo en cuenta el contenido graso global, los perniles se calificaron en cuatro categorías: <10 % (A, jamones magros), >10-16 % (B), >16-20 % (C) y >20 % (D, jamones grasos). En el estudio se incluyeron seis piezas de cada categoría. El grado de engrasamiento de los perniles juega un papel relevante en la calidad sensorial del producto curado, según se ha comprobado en múltiples investigaciones (Segura et al., 2015). Por todo ello, la industria cárnica realiza una clasificación de los perniles frescos (Bañón et al., 1996), considerando el contenido graso y estableciendo habitualmente tres niveles (magros, semigrasos y grasos) (Ventanas, 2012).

Los perniles analizados presentaron valores de pH entre 5,6 y 6,0 sin que se detectaran diferencias significativas ($p > 0,05$) asociadas a la categoría asignada a las piezas. Estos valores se encuentran en el rango de los detectados en otros estudios para este tipo de matrices cárnicas (García-García et al., 2019), y se consideran adecuados para la elaboración del producto curado (Dall'Olio et al., 2020).

El peso de las piezas analizadas fue muy similar en todas las categorías de perniles, en-

contrándose en torno a los 12-13 kg (Tabla 1). El tamaño de las piezas estudiadas se ajusta al habitualmente utilizado para la producción de jamón curado de cerdo blanco (Dall'Olio et al., 2020), y estaría en conformidad a los requerimientos para la elaboración de productos específicos, como E.T.G Jamón Serrano, con un mínimo de peso fresco con pata (mínimo en sangre) de 9,5 kg (European Commission, 1999).

Determinación del espesor de la grasa subcutánea (GS) mediante IRM

La imagen de RM ofrece una información global de las distintas estructuras que constituyen el pernil. Una de las aplicaciones que se ha analizado en este estudio es la validez de esta imagen para estimar el espesor de la GS. Para ello, sobre un corte axial a la altura media del fémur, se determinó la distancia entre la piel y la superficie muscular adyacente (Figura 1a). Este espesor se determinó sobre distintos músculos del pernil (RF y VL analizados de forma conjunta, BF y ST), como se muestra en la Figura 1a y Tabla 2.

Tabla 2. Espesor de la grasa subcutánea (GS, mm) en distintas áreas de perniles frescos.
Table 2. Subcutaneous fat thickness (GS, mm) in different areas of fresh pork legs.

Categoría*	VL/VR	BF	ST	SL
A	4,06 ± 1,10 ^b	4,96 ± 1,37 ^b	6,26 ± 1,61 ^b	5,18 ± 0,11 ^d
B	8,79 ± 3,58 ^a	8,15 ± 2,30 ^a	11,65 ± 2,74 ^a	11,70 ± 0,03 ^c
C	8,07 ± 1,16 ^a	8,71 ± 2,61 ^a	11,68 ± 1,31 ^a	14,05 ± 0,13 ^b
D	10,01 ± 2,56 ^a	8,11 ± 2,25 ^a	10,89 ± 1,99 ^a	15,44 ± 1,16 ^a

*Categoría del pernil en función del contenido graso, tal y como se detalla en la Tabla 1. RF: *rectus femoris*; VL: *vastus lateralis*; BF: *biceps femoris*; ST: *semitendinosus*. ^{a, b, c, d}: Valores con distinta letra en la misma columna presentan diferencias significativas ($p < 0,05$).

La categoría A presentó el espesor más bajo ($p < 0,05$) en las zonas de medida correspondientes a los distintos músculos analizados (Tabla 2). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) cuando se comparó el espesor de la GS sobre cada músculo en los perniles con un contenido de grasa total superior al 10 % (categoría B, C y D). El espesor de la grasa dorsal es un referente para la calificación de los perniles, y de hecho, es un parámetro requerido para asegurar la calidad de determinados productos curados. Tal es el caso de la Especialidad Tradicional Garantizada (E.T.G.) del Jamón Serrano, en la que se requiere un espesor mínimo de 8 mm medido en el punto de convergencia del músculo VL y la punta superior del hueso isquion (European Commission, 1999). La importancia de la GS se debe fundamentalmente a que evita una deshidratación excesiva de la masa muscular, y la retracción desmesurada de la pieza (Peloso et al., 2010).

Durante el desarrollo de este estudio, se ha podido comprobar que la IRM es una técnica que permite, de forma sencilla y rápida, determinar el espesor de la GS en cualquier punto del pernil. Sin embargo, el valor medio del espesor obtenido a la altura de distintos músculos de forma individual, no ha permitido la diferenciación entre perniles con un contenido graso total >10 %. Esto se debe a que la distribución de la grasa subcutánea sobre las superficies consideradas es muy heterogénea. Por tanto, se procedió a seleccionar distintos puntos de fijación de las medidas, donde la GS muestra un mayor espesor y homogeneidad. Con este criterio, se han fijado seis puntos de medida: uno a nivel del músculo ST, tres en la zona media del BF, uno sobre el músculo VL y otro en la zona del RF (Figura 1b). Este espesor promedio fue un parámetro de diferenciación ($p < 0,05$) de los perniles agrupados en las distintas categorías asignadas conforme a su contenido graso total (Tabla 2), con valores mínimos en la categoría A y máximos para la D. Por otra parte, se ha obte-

nido una correlación lineal ($R^2 = 0,85$; $p < 0,05$) entre el contenido de grasa total de los perniles (Tabla 1) y los valores promedios del espesor de la GS en las zonas SL (Figura 2).

Estos resultados indican que el espesor promedio de la GS estimado en las zonas SL en imágenes de RM potenciadas en DP podría utilizarse para la categorización de perniles frescos destinados a la elaboración de jamones curados, de forma similar a las medidas establecidas para distintos productos. En esta línea, y como se ha mencionado, en el pliego de la E.T.G. del Jamón Serrano se establece un espesor mínimo de la GS medido en la punta del pernil recortado (European Commission, 1999). En esta misma zona del pernil, la Indicación Geográfica Protegida (I.G.P.) Jamón de Trevélez establece, en virtud del espesor de la GS, distintos tiempos de curado (BOJA, 2015). Una práctica habitual de la industria cárnica de elaboración de jamón curado es establecer distintos niveles de espesor de la GS (por ejemplo, a nivel del músculo *gluteus medius* antes de perfilar) para estimar tiempos de curado. Un ejemplo de esta naturaleza es la clasificación de los perniles en piezas magras (<10 mm), semigrasas (de 10 a 20 mm) y grasas (>20 mm) para jamones curados que respectivamente llevan a tiempos de curado de 9, 12 y más de 15 meses (Ventanas, 2012).

Los resultados obtenidos en el presente estudio mediante la imagen de RM permiten asociar categorías de perniles con distintos niveles de grasa total con espesores de GS medidos en las zonas SL, sin alteración de la muestra (Tabla 2).

Detección de lesiones internas

En el análisis de las imágenes de RM con distinta potenciación, se detectaron distintas áreas con intensidad de señal anómala o diferenciada del entorno, que se asociaron a distintos tipos de lesiones. En la Figura 3 se

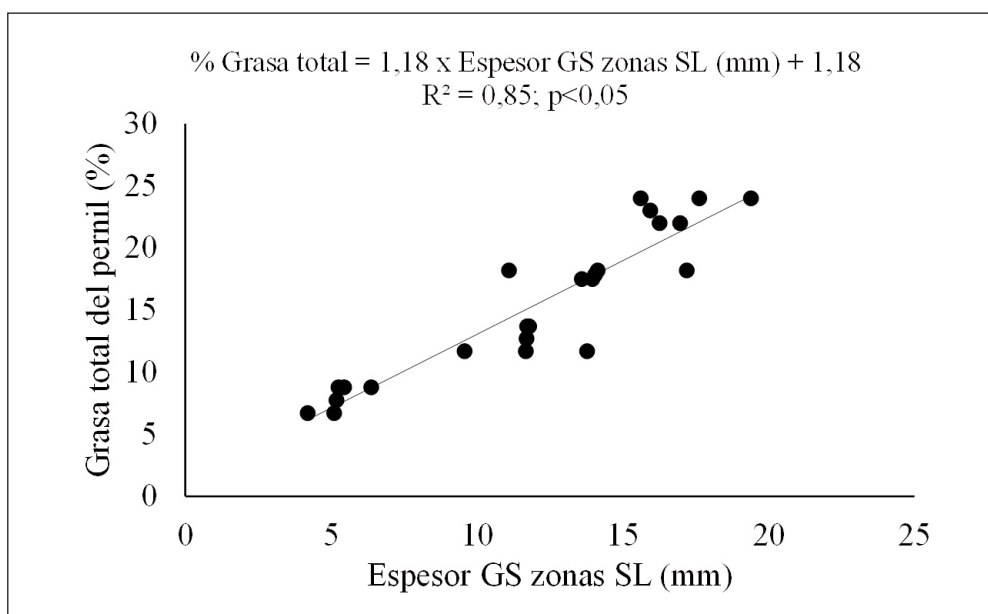


Figura 2. Modelo de regresión lineal entre el espesor promedio (mm) de la grasa subcutánea (GS) obtenido en las zonas seleccionadas (SL) y el contenido graso total del pernil (%). SL: Obtenido tal y como se indica en la Figura 1b.

Figure 2. Linear regression model between the average thickness (mm) of subcutaneous fat (GS) obtained in the selected zones (SL) and the total fat content of the pork leg (%). SL: Obtained as shown in Figure 1b.

muestran imágenes de las principales lesiones halladas. Entre las alteraciones más frecuentes cabe destacar:

- Acúmulos de sangre hallados en las piezas en distintas localizaciones, caracterizados como zonas hiperintensas en imágenes potenciadas en DP, T₂ y T₂*, y como zonas hipointensas en imágenes potenciadas en T₁. Estas anomalías se observaron tanto en imágenes en el plano axial como en el sagital, y se detectaron tanto en masas musculares como en el interior de cavidades articulares (especialmente en la coxofemoral). La naturaleza de estas lesiones fue confirmada tras la disección de los perniles (Figura 3). La aparición de estas alteraciones en perniles frescos es consecuente a traumatismos que derivan en la rotura de va-

sos sanguíneos y las consiguientes hemorragias de mayor o menor intensidad. Arduini et al. (2014) asociaron la presencia de defectos relacionados con el sistema vascular al transporte del animal, sobre todo cuando se trata de recorridos de larga distancia. Como causas *postmortem*, cabe indicar, que en las peladoras continuas se pueden producir golpes que afectan a las extremidades posteriores. Por otra parte, el colgado de las canales puede dar lugar a giros sobre la extremidad de la que pende, afectando a la articulación coxofemoral. Además, la producción de pequeñas hemorragias se han descrito tras el aturdimiento eléctrico debido a las fuertes convulsiones (Marcon et al., 2019; Arnau, 2021). En general, la presencia de sangre pueden des-

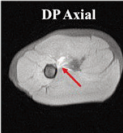
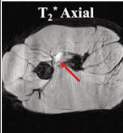
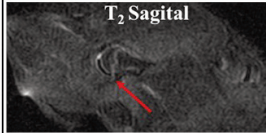
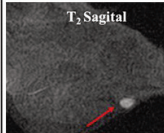
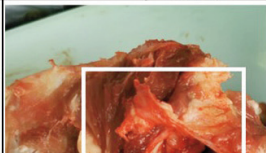
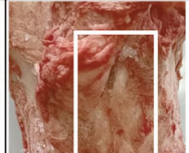
TIPO DE LESIÓN DETECTADA	Acúmulos de sangre		Luxación completa con rotura de la cápsula y ligamentos de la articulación coxofemoral	Hipertrofia del ganglio popliteo	Desgarros musculares	Fisura ósea (sin desplazamiento)
IMÁGENES DE RM						
IMÁGENES OBSERVADAS TRAS DISECCIÓN						
POSIBLES DEFECTOS EN JAMÓN CURADO	Manchas verdes, ocreas o marrones/ Proliferación de microorganismos		Textura pastosa/ Sabor y aroma anómalo/Aparición de coquera	Sabor y aspecto desagradable/ Textura chuclosa	Textura deficiente/ Riesgos de alteración microbiológica	Puede pasar desapercibida en el producto curado, sin ser causa de alteración

Figura 3. Lesiones observadas con más frecuencia en pernils frescos.
Figure 3. Most frequently observed lesions on fresh pork legs.

embocar en la aparición de manchas verdes, ocreas o marrones, como resultado de su oxidación durante el proceso de curado (Arnau, 2021). Tal y como indican Moro *et al.* (2011), estas manchas de las tonalidades indicadas se asocian a la presencia de hemoglobina, y aparecen con una mayor incidencia en el músculo ST. Las zonas con acúmulo de sangre son especialmente susceptibles de presentar un deterioro bacteriano (Čandek-Potokar y Škrlep, 2012).

- Luxaciones de las articulaciones coxofemoral y femorotibial, observadas tanto en el plano axial como en el plano sagital. Estas lesiones se presentaron con distinta intensidad, siendo más frecuentes en la articulación coxofemoral, incluyendo roturas de la cápsula y ligamentos articulares, así como desplazamiento de la cabeza del fémur por rotura del ligamento teres (Figura 3). En las articulaciones afectadas, se observaron zonas hipointensas en las imágenes potenciadas en T₁, T₂ y T₂*, asociadas a la entrada de aire.
- Conforme se ha descrito previamente (Arnau, 2021), la entrada de aire por diversas causas en el interior de las cavidades articulares puede ser uno de los factores que favorece la aparición de mohos a lo largo del proceso de curado, el desarrollo de tex-

turas pastosas y de sabores y aromas anómalos. Además, el acceso abierto a la cavidad articular puede favorecer la aparición de coqueras, es decir, la proliferación de microorganismos en oquedades generando olores desagradables, tanto en el área afectada como en las superficies adyacentes (Sánchez-Molinero y Arnau, 2010). Estas zonas son también más propicias para la presencia de ácaros.

- Fisuras y fracturas óseas, detectadas en el plano sagital, como zonas hipointensas en imágenes potenciadas en T_1 . Se trata de hallazgos menos frecuentes que se han observado en el cuerpo del fémur (Figura 3). En el caso de las fracturas sin desplazamiento, y siempre que no se produzca entrada de aire, podrían no tener consecuencias manifiestas en la calidad del producto curado. Cuando la fractura indica desprendimiento de fragmentos (lesión no detectada), las esquirlas óseas podrían encontrarse en los cortes de jamón curado e incluso llegar al consumidor. Si las fracturas conllevan la entrada de aire, las alteraciones en el producto curado serían similares a las descritas en las luxaciones articulares.
- Las causas de las lesiones a nivel óseo y articular se deberían a traumatismos más o menos intensos en el manejo *perimortem* del animal o de la canal, de forma similar a lo indicado en los acúmulos de sangre (Marcato, 1990).
- Desgarros musculares, visualizados en el plano sagital como zonas hipointensas en imágenes potenciadas en T_1 (Figura 3). Estas lesiones implican el desplazamiento o la rotura de fibras y/o de las fascias musculares (epimisio). Las causas más habituales están relacionadas con la descarga de los animales de los camiones de transporte o por peleas durante el estabulado (Vitali et al., 2021). De la misma forma que ocurre con los problemas a nivel articular, durante el proceso de elaboración del jamón

curado, la existencia de desgarros potenciaría el riesgo de proliferación de microorganismos, incluso la aparición de coqueras (Arnau, 2021), así como la aparición de texturas deficientes, generalmente seca por la penetración de aire.

- Hipertrofia de ganglios poplíteos superficiales, observados en el plano sagital como zonas hipointensas en las imágenes de RM potenciadas en T_1 , y como zonas hiperintensas en las imágenes potenciadas en T_2 (Figura 3). El aumento de tamaño de estos ganglios poplíteos no tiene ninguna repercusión a nivel microbiológico, sin embargo, se relacionan con sabores desagradables, texturas chiclosas y otros problemas a nivel sensorial (Arnau, 2021).

En un análisis global, cabe indicar que la mayor parte de los hallazgos se correspondieron con lesiones menores (acúmulos de sangre de pequeña intensidad y desgarros musculares), que podrían pasar desapercibidas por otras metodologías no destructivas. En este estudio, estas lesiones se detectaron con una incidencia de entre 30-37 %. Entre las lesiones de mayor calado, la articulación más afectada fue la coxofemoral, con una incidencia de luxación o rotura articular de en torno al 10 %.

Conclusiones

De la realización de este trabajo se concluye que la IRM es una técnica no destructiva que puede utilizarse para la selección de perniles frescos destinados a la elaboración de jamón curado. Su aplicación al estudio del espesor de la GS permite obtener valores precisos de este parámetro, aportando la posibilidad de clasificar y seleccionar perniles frescos con distinto contenido graso en función de su espesor. La IRM es una herramienta que permite también la detección y el análisis de lesiones internas en distintos planos anatómicos. En conjunto, esta metodología tiene un elevado

potencial de aplicación en la industria cárnica, con el objetivo de obtener un producto curado de mayor calidad y reducir al máximo las pérdidas a nivel económico por la aparición de alteraciones. Todo esto, unido a la innovación en el diseño de equipos de bajo campo mucho más eficientes y económicos, el desarrollo de nuevas secuencias y la aplicación de la Inteligencia Artificial al análisis de imagen facilitan su implantación en líneas de producción. No obstante, es necesario crear bases de datos sólidas para llegar a la detección automática de lesiones y defectos. Este estudio es un análisis preliminar en esta línea y se requiere, por tanto, incrementar las investigaciones para alcanzar este objetivo.

Agradecimientos

Gracias al Proyecto financiador PID2019-107542RB-C22: Metodologías de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) como herramientas de automatización y control en el sector cárnico. A BiolmaC (Bioimagen Complutense), uno de los nodos de la ICTS ReDiB. A Luis Calvo Adiego, Montserrat García García y Raquel Reina Toribio (Cárnicas Lorient Piqueras, S. A., Tarancón).

Material complementario

El material complementario de este artículo se puede consultar en la URL <https://doi.org/10.12706/itea.2023.018>

Referencias bibliográficas

ANICE (2022). Asociación Nacional de Industrias de la Carne de España. Disponible en: https://www.anice.es/industrias/el-sector/el-sector-carnico-espanol_171_1_ap.html (Consultado: 10/04/2023)

AOAC (2006). Official methods of analysis 18th ed. AOAC International, Washington D. C., EEUU.

Antequera T., Caballero D., Grassi S., Uttaro B., Perez-Palacios T. (2021). Evaluation of fresh meat quality by Hyperspectral Imaging (HSI), Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Magnetic Resonance Imaging (MRI): A review. *Meat Science* 172: 108340. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108340>

Arduini A., Redaelli V., Luzi F., Dall'Olio S.D., Pace V., Costa L.N. (2014). Effect of transport distance and season on some defects of fresh hams destined for DPO production. *Animals* 4: 524-534. <https://doi.org/10.3390/ani4030524>

Arnau J. (2021). Problemas sensoriales del jamón curado. *Eurocarne: La Revista Internacional Del Sector Cárnico* 297: 39-54.

Bañón, S., Garrido, M.D., Pedaúy, J., Seguí, J. (1996). Clasificación de perniles frescos para la elaboración de jamón Serrano. *Eurocarne* 45: 39-44. Barreiro P., Zheng C., Sun D.W., Hernández-Sánchez N., Pérez-Sánchez J.M., Ruiz-Cabello J. (2008). Non-destructive seed detection in mandarins: Comparison of automatic threshold methods in FLASH and COMSPIRA MRIs. *Postharvest Biology and Technology* 47(2): 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.07.008>

BOJA (2015). Orden de 9 de marzo de 2015, por la que se publica el pliego de condiciones de la Indicación Geográfica Protegida «Jamón de Trevélez». *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*, núm. 51, de 16 de marzo de 2015, pp. 319-322.

Bonfatti V., Carnier P. (2020). Prediction of dry-cured ham weight loss and prospects of use in a pig breeding program. *Animal* 14(6): 1128-1138. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000026>

Bosse R., Müller A., Gibis M., Weiss A., Schmidt H., Weiss J. (2018). Recent advances in cured raw ham manufacture. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58(4): 610-630. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1208634>

Caballero D., Pérez-Palacios T., Caro A., Antequera T. (2021). Use of magnetic resonance imaging to analyse meat and meat products non-destructively. *Food Reviews International* 39(1): 424-440. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1912085>

- Čandek-Potokar M., Škrlep M. (2012). Factors in pig production that impact the quality of dry-cured ham: A review. *Animal* 6(2): 327-338. <https://doi.org/10.1017/S1751731111001625>
- Contreras M., Benedito J., Garcia-Perez J.V. (2021). Ultrasonic characterization of salt, moisture and texture modifications in dry-cured ham during post-salting. *Meat Science* 172: 108356. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108356>
- Dall'Olio S., Aboagye G., Nanni-Costa L., Gallo M., Fontanesi L. (2020). Effects of 17 performance, carcass and raw ham quality parameters on ham weight loss at first salting in heavy pigs, a meat quality indicator for the production of high quality dry-cured hams. *Meat Science* 162: 108012. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108012>
- Damez J.L., Clerjon S. (2008). Meat quality assessment using biophysical methods related to meat structure. *Meat Science* 80(1): 132-149. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.05.039>
- de Prados M., Fulladosa E., Gou P., Muñoz I., Garcia-Perez J.V., Benedito J. (2015). Non-destructive determination of fat content in green hams using ultrasound and X-rays. *Meat Science* 104: 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.01.015>
- European Commission (1999). Commission Regulation (EC) N° 2419/ 1999 of 12 November 1999 supplementing the Annex to Regulation (EC) N° 2301/97 on the entry of certain names in the Register of certificates of specific character provided for in Council Regulation (EEC) N° 2082/92 on certificates of specific character for agricultural products and foodstuffs. *Official Journal of the European Communities*, num. 291 de 13 de noviembre. pp. 25-26.
- García-García A.B., Fernández-Valle M.E., Castejón D., Escudero R., Cambero M.I. (2019). Use of MRI as a predictive tool for physicochemical and rheological features during cured ham manufacturing. *Meat Science* 148: 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.10.015>
- Gou P., Santos-Garcés E., Høy M., Wold J.P., Liland K.H., Fulladosa E. (2013). Feasibility of NIR inter-actance hyperspectral imaging for on-line measurement of crude composition in vacuum packed dry-cured ham slices. *Meat Science* 95(2): 250-255. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.05.013>
- Hernández-Sánchez N., Barreiro P., Ruiz-Altisent M., Ruiz-Cabello J., Fernández-Valle M.E. (2005). Detection of seeds in citrus using MRI under motion conditions and improvement with motion correction. *Concepts in Magnetic Resonance Part B (Magnetic Resonance Engineering)* 26(1): 81-92. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.20041>
- Hernández-Sánchez N., Hills B.P., Barreiro P., Marigheto N. (2007). An NMR study on internal browning in pears. *Postharvest Biology and Technology* 44(3): 260-270. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.002>
- Kademi H.I., Ulusoy B.H., Hecer C. (2019). Applications of miniaturized and portable near infrared spectroscopy (NIRS) for inspection and control of meat and meat products. *Food Reviews International* 35(3): 201-220. <https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1514624>
- Kotwaliwale N., Curtis E., Othman S., Naganathan G.K., Subbiah J. (2012). Magnetic resonance imaging and relaxometry to visualize internal freeze damage to pickling cucumber. *Postharvest Biology and Technology* 68: 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.12.022>
- Lebret B., Čandek-Potokar M. (2022). Review: Pork quality attributes from farm to fork. Part II. Processed pork products. *Animal* 16: 100383. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100383>
- Leighton P.L.A., Segura J., Lam S., Marcoux M., Wei X., López-Campos O., Soladoye P., Dugan M.E.R., Juárez M., Prieto N. (2022). Prediction of Carcass Composition and Meat and Fat Quality Using Sensing Technologies: A Review. *Meat and Muscle Biology* 5(3): 12951. <https://doi.org/10.22175/mmb.12951>
- Manzocco L., Anese M., Marzona S., Innocente N., Lagazio C., Nicoli M.C. (2013). Monitoring dry-curing of S. Daniele ham by magnetic resonance imaging. *Food Chemistry* 141(3): 2246-2252. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.068>

- MAPA (2022). Informe anual de la Industria Alimentaria Española. Periodo 2021-2022. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Gobierno de España, 13 pp..
- Marcato P.S. (1990). Anatomía e Histología Patológica Especial de los mamíferos domésticos. Editorial Interamericana. Madrid, España.
- Marcon A.V., Caldara F.R., de Oliveira G.F., Gonçalves L.M.P., Garcia R.G., Paz I.C.L.A., Crone C., Marcon A. (2019). Pork quality after electrical or carbon dioxide stunning at slaughter. *Meat Science* 156: 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.04.022>
- Melado-Herreros A., Fernandez-Valle M.E., Hernandez-Sanchez N., Jimenez-Ariza T., Verlinden B., Val J., Barreiro P. (2013). On-line MRI sequences for the evaluation of Apple internal quality. Inside Food Symposium, 9-12 abril, Leuven, Belgium.
- Mitchell A.D., Scholz A.M., Wange P.C., Song H. (2001). Body composition analysis of the pig by magnetic resonance imaging. *Journal of Animal Science* 79: 1800-1813. <https://doi.org/10.2527/2001.7971800x>
- Moro S., Restelli G.L., Arrighi S., Moretti V., Bontempo V., Rizzi R., Stella A., Pagnacco G. (2011). Genetic and environmental effects on a meat spotting defect in seasoned dry-cured ham. *Italian Journal of Animal Science* 10(1): e7 <https://doi.org/10.4081/ijas.2011.e7>
- Peloso J.V., Lopes P.S., Gomide L.A.M., Guimarães S.E.F., Carneiro P.L.S. (2010). Carcass and ham quality characteristics of heavy pigs from different genetic groups intended for the production of dry-cured hams. *Meat Science* 86(2): 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.017>
- Pérez-Palacios T., Caballero D., Caro A., Rodríguez P.G., Antequera T. (2014). Applying data mining and Computer Vision Techniques to MRI to estimate quality traits in Iberian hams. *Journal of Food Engineering* 131: 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.01.015>
- Pérez-Santaescolástica C., Fraeye I., Barba F.J., Gómez B., Tomasevic I., Romero A., Moreno A., Toldrá F., Lorenzo J.M. (2019). Application of non-invasive technologies in dry-cured ham: An overview. *Trends in Food Science and Technology*, 86: 360-374. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.011>
- Sánchez-Molinero F., Arnau J. (2010). Processing of dry-cured ham in a reduced-oxygen atmosphere: Effects on sensory traits. *Meat science* 85(3): 420-427. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.02.010>
- Segura J., Escudero R., Romero de Ávila M.D., Cambero M.I., López-Bote C.J. (2015). Effect of fatty acid composition and positional distribution within the triglyceride on selected physical properties of dry-cured ham subcutaneous fat. *Meat Science* 103: 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.01.008>
- Uecker M., Zhang S., Voit D., Karaus A., Merboldt K.D., Frahm J. (2010). Real time MRI at a resolution of 20 ms. *NMR in Biomedicine* 23(8): 986-994. <https://doi.org/10.1002/nbm.1585>
- Ventanas J. (2012). Jamón Ibérico y Serrano. Fundamentos de la elaboración y de la calidad. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 197 pp.
- Vitali M., Bosi P., Santacroce E., Trevisi P. (2021). The multivariate approach identifies relationships between pre-slaughter factors, body lesions, ham defects and carcass traits in pigs. *PLoS ONE* 16(5): e0251855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251855>

(Aceptado para publicación el 16 de octubre de 2023)