

MODELADO GEOMÉTRICO DE MATERIALES BIOLÓGICOS A PARTIR DE IMÁGENES DE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

Sandro M. Goñi^{a,b,c}, Emmanuel Purlis^a, y Viviana O. Salvadori^{a,c}

^aCIDCA, Fac. de Ciencias Exactas, UNLP-CONICET. 47 y 116, (B1900AJJ) La Plata, Argentina

^bDepto. Ciencia y Tecnología, UNQ. R. Sáenz Peña 352, (B1876BXD) Bernal, Argentina.

^cMODIAL, Área Deptal. Ing. Química, Fac. de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina.

smgoni@cidca.org.ar

Palabras Clave: Reconstrucción 3D, Geometría real, Forma irregular, Simulación.

Resumen. Un paso fundamental en la simulación numérica de procesos de interés en ingeniería de alimentos es la selección de una representación geométrica adecuada del alimento, para ser utilizada como dominio de simulación. Debido a la dificultad para describir correctamente la forma real (generalmente irregular) de los alimentos, se han considerado ampliamente geometrías simples y regulares, aproximadas y derivadas de las formas reales para tal fin. El objetivo de este trabajo fue modelar la geometría real de diversos alimentos de interés industrial, a través de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes. La reconstrucción aproximada de los objetos 3D se realizó a partir de un número finito de imágenes de secciones (2D) de las muestras, obtenidas a través de resonancia magnética nuclear (RMN). Luego, dichas imágenes se convirtieron al espacio binario, donde se obtuvo el contorno de las secciones mediante curvas *B-Spline*. Seguidamente, se ensamblaron las diferentes curvas representando el contorno de los cortes transversales, resultando en una superficie NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*), la cual representa la frontera 3D del alimento. Por último, esta superficie se convirtió en un sólido 3D. El método completo fue implementado en MATLAB[®] y COMSOL Multiphysics[™]. Los resultados mostraron una alta correspondencia entre la forma real del alimento y la obtenida a través del método de reconstrucción utilizado. La técnica RMN presenta características interesantes para los fines buscados: es no-destructiva, rápida y genera imágenes con bajo nivel de ruido. Este último aspecto es esencial a la hora de obtener el borde irregular del objeto, el cual debe ser suave si se quiere usar la geometría como dominio de simulación de un proceso.

1 INTRODUCCIÓN

El modelado matemático y la simulación computacional de procesos son temas muy importantes en la ingeniería de alimentos actual. Más allá de los principios de fenómenos de transporte involucrados en la formulación de un modelo matemático, resulta necesario definir un dominio o representación geométrica del sistema real. Los alimentos presentan, en general, formas multidimensionales e irregulares por naturaleza, por lo que es necesario contar con métodos de predicción adecuados para este tipo de productos. Un enfoque muy útil para predecir los tiempos de proceso de materiales multidimensionales, es el uso de un factor de forma (E) en combinación con métodos confiables para calcular el tiempo de procesamiento de una placa plana (Hossain et al., 1992b):

$$t_{multi} = \frac{t_{pp}}{E} \quad (1)$$

donde t_{multi} es el tiempo de procesamiento correspondiente a un producto multidimensional general y t_{pp} es el tiempo calculado para una placa plana de igual dimensión característica.

En este sentido, se han publicado muchos artículos abarcando el desarrollo de métodos simples de predicción de tiempos de proceso aplicables a geometrías multidimensionales, con algún tipo de regularidad: varillas, bloques rectangulares, cilindros finitos, esferoides, etc. Así, fueron estudiados, entre otros, la congelación y la descongelación (Cleland et al., 1987; Hossain et al., 1992a, b), la refrigeración (Lin et al., 1996a, b) y el secado de alimentos (Sahin y Dincer, 2005). La principal ventaja de este tipo de métodos es su simplicidad para calcular los tiempos de proceso. Sin embargo, estos métodos simples son usualmente válidos para un número acotado de condiciones operativas. Además, sólo la temperatura (o concentración) del centro del producto y/o el valor medio de dichas variables pueden ser obtenidos a través de los mismos.

Del análisis de la literatura específica, resulta evidente que aún es necesario encontrar una metodología adecuada para modelar y simular en forma precisa el procesamiento de productos multidimensionales irregulares. Un enfoque apropiado es considerar la geometría y las dimensiones reales del alimento. Aunque este enfoque aparece como muy útil y preciso, ya que el “proceso real” sería modelado y simulado, se han reportado pocos trabajos en comparación con el enfoque anterior. Las principales razones radican en la complejidad existente para describir la geometría real de un alimento, y en la resolución del problema generado, los requerimientos computacionales del caso.

Gustafson et al. (1979) analizaron la distribución de temperatura y esfuerzos durante el calentamiento o enfriamiento de granos de maíz, considerando una sección irregular 2D. Para evaluar la destrucción térmica de agaritina en hongos enlatados, Sastry et al. (1985) describieron la geometría 3D del alimento usando determinadas dimensiones características. En la cocción de piezas de carne, Califano y Zaritzky (1993) usaron geometrías 2D irregulares obtenidas a partir de la digitalización de fotografías de muestras. Luego, en base al mismo procedimiento, se simuló la congelación y descongelación de sistemas 2D de forma arbitraria (Califano y Zaritzky, 1997).

Ngadi et al. (1997) simularon la cocción por inmersión en aceite de patas de pollo sobre una geometría irregular 2D, diferenciando distintas regiones: músculo, hueso, tendón y cartílago. Para determinar los factores de forma usados en la predicción de tiempos de refrigeración, congelación y descongelación de cortes de carne vacuna, Crocombe et al. (1999) utilizaron una técnica de escaneado láser tridimensional para describir la geometría. Los datos de la superficie 3D fueron ajustados a una superficie de Hermite bicúbica para

modelar la forma de los cortes de carne.

Davey y Pham (2006) modelaron la transferencia de energía y materia durante la refrigeración por aire de una media res vacuna, la cual se supuso como una sección 2D compuesta de diferentes cortes que fueron descritos geoméricamente por separado. Basados en este trabajo, Trujillo y Pham (2006) extendieron la geometría de la media res a tres dimensiones. Asimismo, Purlis y Salvadori (2005) también trabajaron sobre una geometría 3D en la cocción de cortes de carne vacuna. El dominio 3D fue generado por extrudado en dirección axial de una geometría 2D de borde irregular, representado por una curva *B-Spline*, construida a partir de una imagen de la sección transversal de la muestra.

Considerando otras ramas de la ciencia, también resulta necesario contar con descripciones geométricas precisas de diversos materiales. Este es el caso de la medicina: en los últimos años se han ido incorporando herramientas de reconstrucción por computadora al estudio y análisis de diferentes temas. Por ejemplo, la reconstrucción de partes del cuerpo para planificar detalladamente una cirugía (Sodian et al., 2007), o estudiar en profundidad problemas cardiovasculares (Grousson et al., 2006), o para realizar implantes más eficientes (Cheung y Zhang, 2005).

Teniendo en cuenta lo expuesto, el objetivo de este trabajo fue desarrollar un método preciso para modelar la geometría real de diversos materiales biológicos de interés y aplicación general, a través de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y elementos finitos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La ingeniería reversa es un método para establecer modelos geoméricos CAD (*Computer Aided Design*) por digitalización a partir de muestras, prototipos, moldes o partes manufacturadas. Para aplicaciones de ingeniería reversa puede usarse una técnica CAD llamada “*skinning*” o “*lofting*”, que es un caso especial del diseño de superficies por secciones transversales (Piegl, 1991). Brevemente, el *skinning* de superficie consiste en pasar una superficie suave a través de un conjunto de curvas denominadas “de sección transversal” (Piegl y Tiller, 1996). La descripción matemática más usada de las curvas y superficies de forma libre es la conocida representación NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) (Moustakides et al., 2000).

El modelado geométrico consiste en obtener una representación computacional de la geometría real de un objeto. En este trabajo, la reconstrucción tridimensional fue implementada en MATLAB[®] y COMSOL Multiphysics[™] (versión 3.2). Las muestras usadas fueron dos: un corte de carne vacuna (músculo *semitendinoso*) y una res entera de cordero.

2.1 Adquisición de imágenes 2D

En este trabajo, las imágenes de las secciones transversales se adquirieron a lo largo del eje axial de las muestras usando la técnica de resonancia magnética nuclear (RMN). Los ensayos fueron realizados en un resonador magnético de alto campo (1.5 Tesla) Siemens Magnetom VISION Plus. La distancia entre secciones fue de 1.6 cm para el corte de carne vacuna y de 1 cm para la res de cordero, generando 18 y 80 secciones, respectivamente.

2.2 Procesamiento de imágenes

Con el objetivo de aproximar el borde irregular de cada una de las secciones transversales provenientes de la RMN, se usaron técnicas de procesamiento de imágenes, ejecutadas mediante un programa *ad-hoc* desarrollado en código MATLAB.

A continuación, se describen brevemente los pasos básicos implementados:

1. Se realizaron sucesivas transformaciones del nivel de gris de las imágenes (Gonzalez et al., 2004) con el objetivo de mejorar el rango dinámico y el contraste de las mismas, y luego éstas se filtraron usando un filtro mediano.

2. Las secciones se segmentaron por umbralización, a partir de un valor de umbral obtenido de los histogramas de nivel de grises de las imágenes filtradas, obteniéndose imágenes binarias donde el fondo es de color negro y el objeto de interés es de color blanco.

3. Se generó, mediante interpolación de un subconjunto de píxeles del contorno de la imagen binaria, una curva *B-Spline* cerrada que representa una aproximación continua del borde discreto de cada sección transversal. Repitiendo el procedimiento para todas las imágenes, se obtuvo una curva de contorno para cada sección transversal.

2.3 Técnica de *lofting*

Las curvas *B-Spline* que aproximan el borde de cada sección transversal fueron ensambladas por medio de una técnica de *lofting* en COMSOL Multiphysics™, construyendo una superficie NURBS cerrada a través de las curvas *B-Spline*. La superficie resultante fue luego transformada en un sólido 3D. Vale aclarar que el número de segmentos de cada curva *B-Spline* debe ser el mismo en todos los bordes extraídos para llevar a cabo el *lofting* (COMSOL Multiphysics User's Guide).

2.4 Elementos finitos

Finalmente, el modelo geométrico construido puede ser usado en varias aplicaciones. Una posibilidad, ya mencionada, es usar el objeto reconstruido como dominio de simulación de un determinado modelo matemático. Otra aplicación puede ser el cálculo del área superficial y volumen del objeto irregular (Goñi et al., 2007). En ambas situaciones, se puede usar el método de elementos finitos, tanto para resolver un problema matemático como para calcular las propiedades físicas antes citadas.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se muestran las diferentes etapas básicas del procesamiento de imágenes implementado sobre las secciones originales. Este ejemplo es representativo de todas las imágenes, independientemente de la muestra en cuestión. Como puede verse, la alta definición y el bajo nivel de ruido de las imágenes originales permiten segmentar las secciones en forma eficiente, lo cual se traduce en una representación 2D que resulta una muy buena aproximación del borde irregular de las mismas.

Los resultados finales de la reconstrucción del cuerpo irregular por la técnica de *lofting* aplicada a músculo *semitendinoso* pueden observarse en la Figura 2. En la misma se compara una fotografía del alimento real con el sólido 3D obtenido en COMSOL, demostrando que el modelo geométrico se asemeja notablemente al alimento real. Este gráfico permite destacar además el buen desempeño del método de reconstrucción implementado, que se refleja en la suavidad de la superficie NURBS construida a partir de las secciones transversales.

A fin de analizar el efecto del número de cortes transversales en la geometría final obtenida, se muestran en la Figura 3 tres sólidos reconstruidos a partir de considerar 3, 9 y 14 secciones transversales al implementar el *lofting* respectivamente, y manteniendo en todas el mismo número de segmentos (32) en las curvas *B-Spline*. Como es de esperar, cuanto mayor es la cantidad de secciones transversales involucradas, mayor es la fidelidad del modelo geométrico respecto de la pieza real.

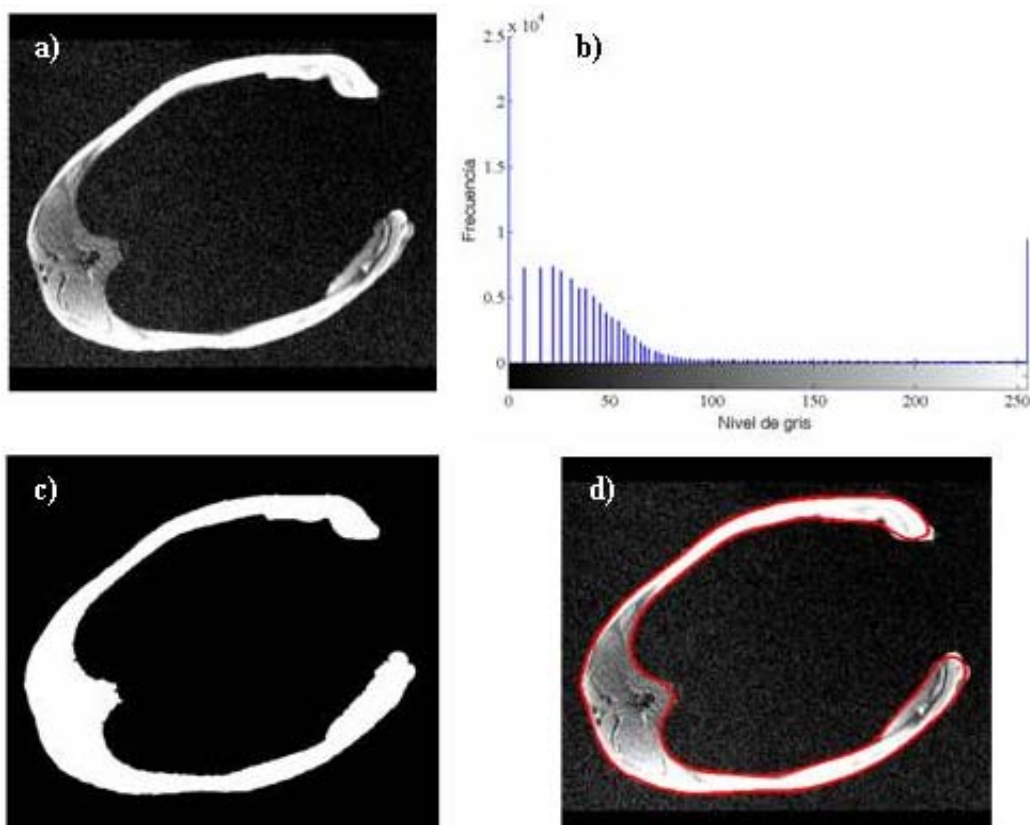


Figura 1: (a) Imagen original obtenida por RMN de la zona media (tórax) de la res de cordero; (b) Histograma de la imagen original; (c) Imagen binaria obtenida por la secuencia de procesamiento; (d) Curva *B-Spline* (en rojo) construida sobre el borde original de la muestra.

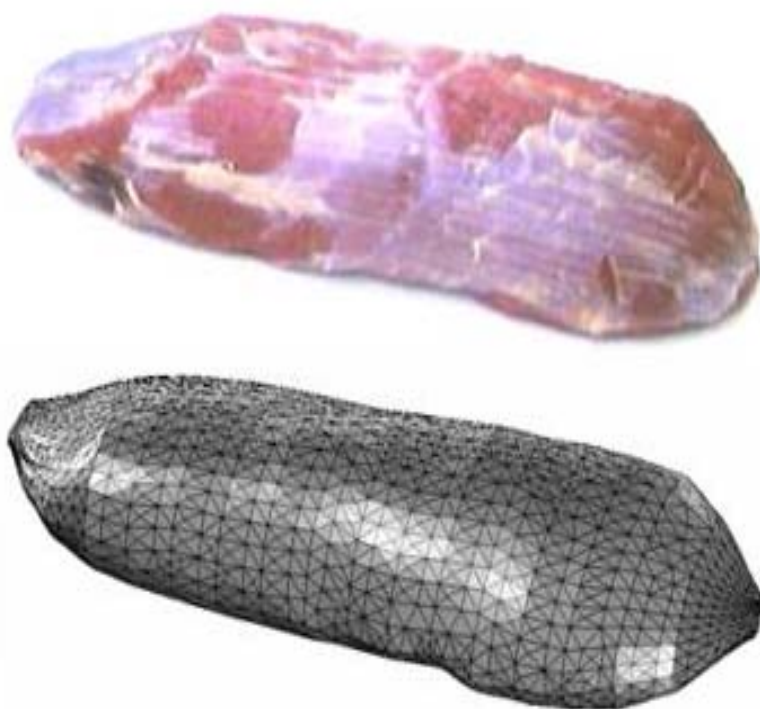


Figura 2: Resultados del *lofting* sobre la muestra de músculo *semitendinoso*. El modelo geométrico se encuentra mallado por elementos finitos

El resultado final de la reconstrucción geométrica también depende del número de segmentos que componen las curvas *B-Spline* representativas del contorno de las secciones, como puede observarse en la [Figura 4](#), donde el *lofting* se realizó utilizando la totalidad de las secciones transversales obtenidas para la muestra (18), para diferentes números de segmentos en las curvas *B-Spline*. Un número bajo de segmentos genera una mala representación de la geometría real; la precisión mejora al aumentar el número de segmentos. Sin embargo, un número excesivo (50 segmentos) genera una malla demasiado densa y no se traduce en una mejora sustancial del modelo geométrico.

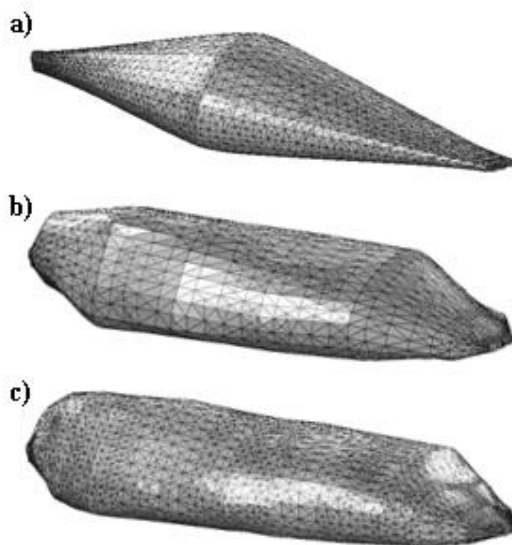


Figura 3: Influencia del número de secciones sobre el *lofting* del corte de carne: (a) 3 secciones; (b) 9 secciones; (c) 14 secciones

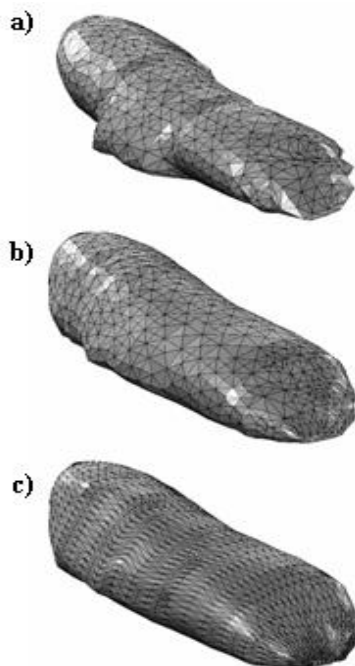


Figura 4: Influencia del número de segmentos de las curvas *B-Spline* del borde sobre el *lofting* del corte de carne: (a) 6 segmentos; (b) 20 segmentos; (c) 50 segmentos

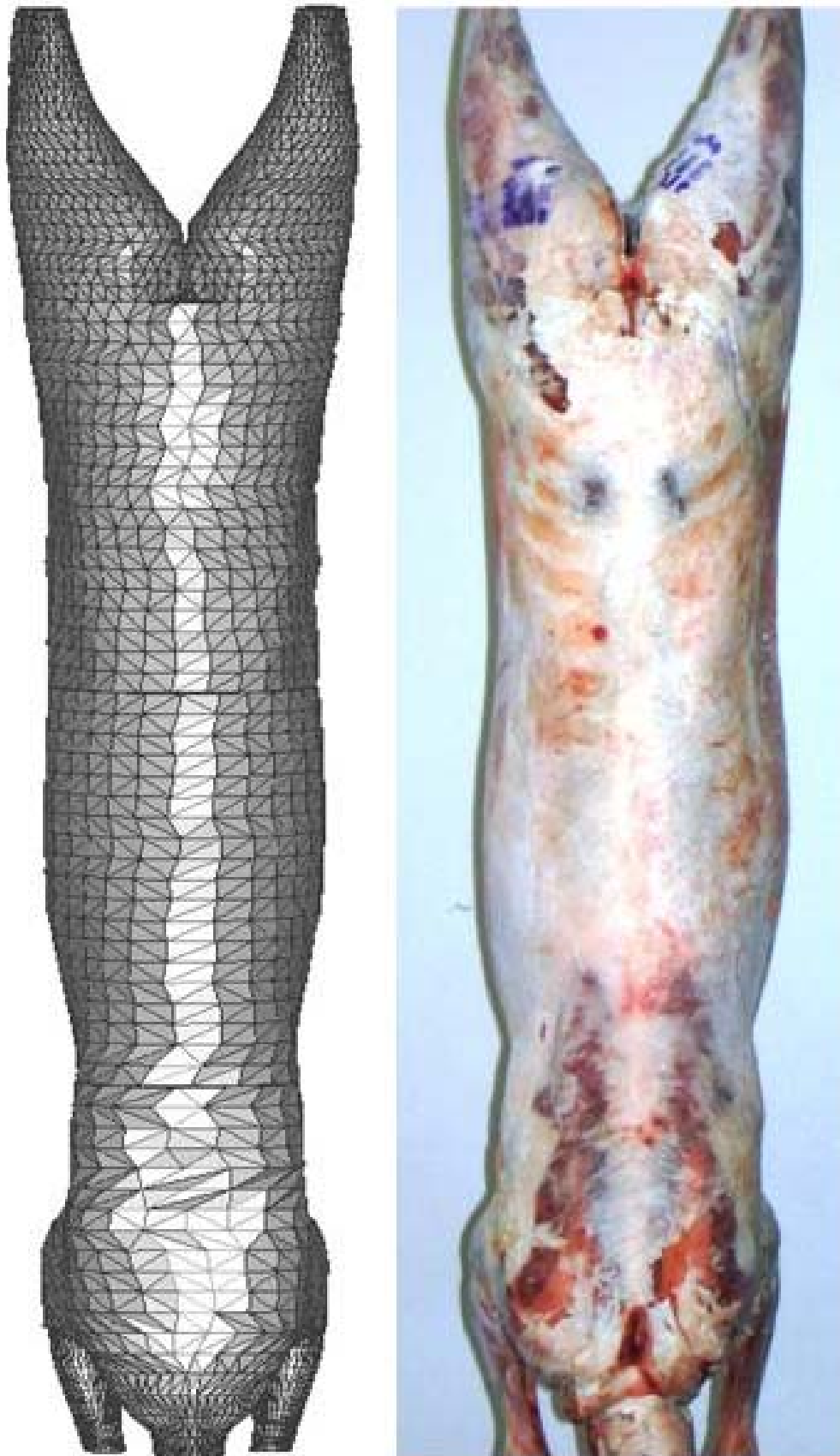


Figura 5: Resultados del *lofting* sobre la res de cordero. El modelo geométrico se encuentra mallado por elementos finitos

Respecto de la res de cordero, en la [Figura 5](#) se muestra el resultado de la reconstrucción. Al igual que en el caso del músculo vacuno, la fidelidad de la representación geométrica respecto del material real es muy alta. Si bien no se realizó en este caso un análisis exhaustivo de la influencia del número de secciones y segmentos de las curvas *B-Spline* sobre el modelo geométrico, puede decirse que cuando la muestra es extremadamente irregular, será necesario trabajar con mayor cantidad de información.

La secuencia de imágenes obtenida de los cuartos traseros de la res de cordero permitió diferenciar distintas regiones (por ej. hueso), por lo cual se implementó una secuencia de procesamiento de imágenes en particular para poder desarrollar un modelo geométrico del cuarto trasero del cordero incorporando el hueso. Para cada imagen se obtuvieron tres curvas *B-Spline*: la primera representando el borde exterior de la imagen, la segunda representando el borde exterior del hueso, y la última representando el borde interior del hueso. La [Figura 6](#) muestra el sólido reconstruido en esta situación, visto desde diferentes ángulos.

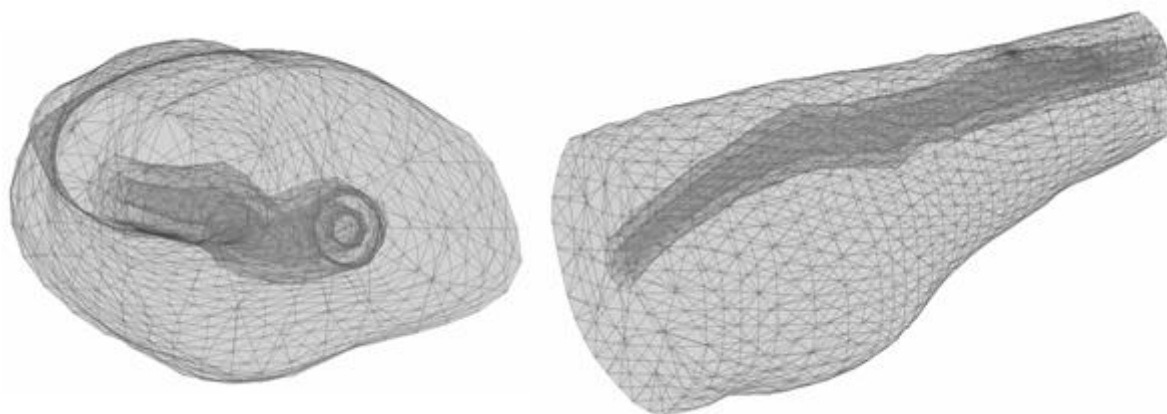


Figura 6: Resultados del *lofting* sobre un cuarto trasero de la res de cordero, incorporando el hueso en la construcción de la representación geométrica

Observando los resultados obtenidos, pueden verse las ventajas del uso de la RMN para adquirir las imágenes de las secciones transversales. En primer lugar, el método permite adquirir imágenes con separaciones arbitrarias entre ellas, pudiendo aumentar la precisión en muestras muy irregulares, sin esfuerzo adicional. En segundo lugar, es una técnica no destructiva, por lo que las mismas muestras podrían ser utilizadas en otras determinaciones experimentales (por ejemplo, historia térmica) y comparar así resultados semejantes en cuanto a geometría. Por último, en comparación con otros métodos como la visión computacional, es una técnica rápida y experimentalmente sencilla. Las desventajas radican en el costo económico de los ensayos y la disponibilidad del equipo necesario.

4 CONCLUSIONES

El método implementado, combinando resonancia magnética nuclear, técnicas de procesamiento de imágenes y diseño por secciones transversales, es adecuado para obtener modelos geométricos tridimensionales de materiales biológicos de formas arbitrarias. Estas representaciones pueden ser usadas en aplicaciones varias de ingeniería de procesos, como así también en medicina y biomecánica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con fondos provenientes de CONICET, ANPCyT (PICT 9-

14677) y UNLP (Proyecto 111103).

REFERENCIAS

- Califano, A.N., and Zaritzky, N.E., A numerical method for simulating heat transfer in heterogeneous and irregularly shaped foodstuffs. *Journal of Food Process Engineering*, 16:159-171, 1993.
- Califano, A.N., and Zaritzky, N.E., Simulation of freezing or thawing heat conduction in irregular two-dimensional domains by a boundary-fitted grid method. *LWT - Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 30:70-76, 1997.
- Cheung, J.T.-M., and Zhang, M., A 3-dimensional finite element model of the human foot and ankle for insole design. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86:353-358, 2005.
- Cleland, D.J., Cleland, A.C., and Earle, R.L., Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae. Part 2: irregular shapes. *International Journal of Refrigeration*, 10:234-240, 1987.
- COMSOL AB. *COMSOL Multiphysics User's Guide*. Version: September 2005, COMSOL 3.2.
- Crocombe, J.P., Lovatt, S.J., and Clarke, R.D., Evaluation of chilling time shape factors through the use of three-dimensional surface modelling. In *Proceedings of 20th International Congress of Refrigeration*, IIR/IIF, Sydney [Paper 353], 1999.
- Davey, L.M., and Pham, Q.T., A multi-layered two-dimensional finite element model to calculate dynamic product heat load and weight loss during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*, 23:444-446, 2000.
- Goñi, S.M., Purlis, E., and Salvadori, V.O., Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 82:536-547, 2007.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., and Eddins, S. L., *Digital Image Processing using MATLAB*. PEARSON Prentice Hall, 2004.
- Grousson, N., Lim, K.-H., Lim, H.-S., Ooi, E.-T., Salgues, S.L.H., Yeo, J.-H., and Goetz, W.A., Ventriculo-aortic junction in human root. A geometric approach. *Journal of Biomechanics*, doi:10.1016/j.jbiomech.2006.10.027, 2006.
- Gustafson, R.J., Thompson, D.R., and Sokhansanj, S., Temperature and stress analysis of corn kernel – finite element analysis. *Transactions of the ASAE*, 22:955-960, 1979.
- Hossain, Md.M., Cleland, D.J., and Cleland, A.C., Prediction of freezing and thawing times for foods of two-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *International Journal of Refrigeration*, 15:235-240, 1992a.
- Hossain, Md.M., Cleland, D.J., and Cleland, A.C., Prediction of freezing and thawing times for foods of three-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *International Journal of Refrigeration*, 15:241-246, 1992b.
- Lin, Z., Cleland, A.C., Cleland, D.J., and Serrallach, G.F., A simple method for prediction of chilling times for objects of two-dimensional irregular shape. *International Journal of Refrigeration*, 19:95-106, 1996a.
- Lin, Z., Cleland, A.C., Cleland, D.J., and Serrallach, G.F., A simple method for prediction of chilling times: extension to three-dimensional irregular shapes. *International Journal of Refrigeration*, 19:107-114, 1996b.
- Moustakides, G., Briassoulis, D., Psarakis, E., and Dimas, E., 3D image acquisition and NURBS based geometry modelling of natural objects. *Advances in Engineering Software*, 31:955-969, 2000.
- Ngadi, M.O., Watts, K.C., and Correia, L.R., Finite element method modelling of moisture

- transfer in chicken drum during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 32:11-20, 1997.
- Piegl, L., and Tiller, W., Algorithm for approximate NURBS skinning. *Computer-Aided Design*, 28:699-706, 1996.
- Piegl, L., On NURBS: a survey. *IEEE Computer Graphics and Application*, 11:55-71, 1991.
- Purlis, E., and Salvadori, V.O., Meat cooking simulation by finite elements. In *Proceedings of ENPROMER 05, 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering 2005*, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- Sahin, A.Z., and Dincer, I., Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. *Journal of Food Engineering*, 71:119-126, 2005.
- Sastry, S.K., Beelman, R.B., and Speroni, J.J., A three-dimensional finite element model for thermally induced changes in foods: application to degradation of agaritine in canned mushrooms. *Journal of Food Science*, 50:1293-1299, 1326, 1985.
- Sodian, R., Weber, S., Markert, M., Rassouljian, D., Kaczmarek, I., Lueth, T.C., Reichart, B., and Daebritz, S., Stereolithographic models for surgical planning in congenital heart surgery. *The Annals of Thoracic Surgery*, 83:1854-1857, 2007.
- Trujillo, F.J., and Pham, Q.T., A computational fluid dynamic model of the heat and moisture transfer during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*, 29:998-1009, 2006.