

EXPL. FOLIO 512 2021  
FECHA: 25 OCT 2021

Oro Verde, 25 de octubre de 2021

Sr. Director de la Carrera de Doctorado en Ingeniería

Universidad Nacional de Entre Ríos

Dr. Bioing. Rubén Acevedo

De mi consideración:

Por la presente me dirijo a usted como alumno regular del Doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional de Entre Ríos, para solicitar la conformación del tribunal evaluador para mi tesis, denominada "Generación y simulación de modelos músculo-esqueléticos específicos a partir de imágenes médicas, para el diagnóstico y tratamiento de anomalías en la marcha".

Adjunto a la presente, la nota de aval del director de tesis, Dr. Bioing. Ariel Braidot, y el resumen extendido de la misma.

Sin otro particular quedo a su disposición y reciba un cordial saludo.



Mg. Ing. Biomedico Marco Antonio López Ibarra

Doctorando

mlopezibarra @ ingenieria.uner.edu.ar

marco3407 @ gmail.com

-----CERTIFICO QUE EL PRESENTE DOCUMENTO PRESENTADO POR MARCO ANTONIO LOPEZ IBARRA QUE CONSTA DE SEIS (6) FOJAS, ES COPIA AUTÉNTICA Y CONCUERDA CON EL ORIGINAL QUE HE TENIDO A LA VISTA.- ORO VERDE, 25 de octubre de 2021. -----

FIRMADO DIGITALMENTE  
SONIA E. CARABALLO

Oro Verde, 25 de octubre de 2021

Sr. Director de la Carrera de Doctorado en Ingeniería

Universidad Nacional de Entre Ríos

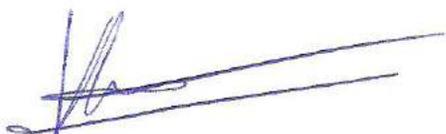
Dr. Bioing. Rubén Acevedo

De mi consideración:

Me dirijo a usted, en mi carácter de Director de tesis del doctorando Mg. Ing Biomédico. Marco Antonio López Ibarra, para expresar que ha concluido las tareas previstas en el Plan de Tesis que oportunamente presentó y que su Tesis se encuentra en condiciones para su presentación y defensa oral.

Por la presente, avalo la solicitud de conformación de tribunal evaluador para su Tesis, cuyo título es "Generación y simulación de modelos músculo-esqueléticos específicos a partir de imágenes médicas, para el diagnóstico y tratamiento de anomalías en la marcha" presentada por el Mg. Ing Biomédico. Marco Antonio López Ibarra.

Sin otro particular quedo a su disposición y reciba un cordial saludo.



Dr. Bioing. Ariel Braidot

Director



**Universidad Nacional  
de Entre Ríos**

Doctorado en Ingeniería  
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ciencias de la  
Alimentación e Ingeniería

## **Resumen Extendido Tesis Doctoral**

**Título:** Generación y simulación de modelos músculo-esqueléticos específicos a partir de imágenes médicas, para el diagnóstico y tratamiento de anomalías en la marcha.

**Tesista:** Marco Antonio López Ibarra

**Director:** Dr. Bioing. Ariel Braidot

### **Introducción**

Los Modelos Músculo-Esqueléticos (MME), son herramientas útiles para lograr un correcto entendimiento de la marcha de personas que sufren algún tipo de discapacidad o enfermedad que afecte su locomoción. En términos generales se pueden definir 2 tipos de modelos. Los Modelos Genéricos Escaldos (MGE) a la anatomía del paciente, y Modelos Específicos basados en imágenes (ME). Hoy en día en el ámbito clínico, las herramientas computacionales utilizadas para la toma de decisiones en el tratamiento de problemas en la marcha están basadas en MGE. Sin embargo, a pesar de que los MGE son 'fáciles' de aplicar y que han generado conocimientos clínicos muy importantes, ha sido demostrado que su aplicabilidad en el tratamiento de pacientes específicos es muy limitada debido entre otras razones, a que estos modelos están basados en la anatomía de sujetos cadavéricos de estatura y peso promedio. Por esta razón, se hace necesario generar bases de datos de parámetros antropométricos obtenidos *in vivo*, tanto de sujetos sanos como con patologías específicas, que contengan información que permita mejorar los resultados obtenidos de la simulación de estos modelos.

Los ME al estar basados en imágenes propias del sujeto a ser estudiado, han mostrado un mejor desempeño en la estimación de parámetros biomecánicos. Sin embargo, la generación de los ME requiere la inversión de grandes cantidades de tiempo en la segmentación de las imágenes por parte de expertos médicos, altos requerimientos computacionales, y altos costos económicos necesarios para la obtención de las imágenes médicas. Por esta razón se hace necesario generar herramientas computacionales, especialmente en el área de la segmentación de imágenes, que permitan disminuir los costos y requerimientos para la generación de estos modelos.

Tanto los MGE y los ME utilizan para su simulación parámetros como los puntos de origen e inserción, los caminos rectos que unen estos puntos y las longitudes musculares. Estos parámetros anatómicos son utilizados dentro de los MME en el cálculo del aporte individual de cada músculo al movimiento total del cuerpo y por lo tanto son los parámetros que pueden generar una diferencia entre los resultados obtenidos con los ME



**Universidad Nacional  
de Entre Ríos**

Doctorado en Ingeniería  
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ciencias de la  
Alimentación e Ingeniería

y los obtenidos con un MGE. Los parámetros a los cuales los MME presentan mayor sensibilidad son: los brazos de momento musculares cuyas estimaciones dependen de la identificación de las ubicaciones estimadas de origen e inserción musculares y las líneas de acción del sistema músculo-tendón.

### **Objetivos:**

- Generar modelos músculo-esqueléticos específicos a partir de imágenes médicas, que se utilizan para la estimación de los parámetros antropométricos requeridos en el análisis de la marcha.
- Generar bases de datos de parámetros antropométricos calculados para una población de sujetos sanos, a partir de los datos obtenidos con los modelos generados.

### **Metodología:**

Usando equipos de Resonancia Magnética (RM) de 1.5T, se obtuvieron un conjunto de estudios de imágenes de un grupo de cinco sujetos sanos. Estos estudios abarcaban desde la primer vertebra lumbar (L1) hasta la punta de los pies de todos los sujetos medidos. Los conjuntos de imágenes para cada sujetos tienen al menos setecientas imágenes segmentadas. Los parámetros de adquisición de estos estudios fueron seleccionados con la ayuda de un especialista en imágenes médicas, con la intención de permitir una mayor diferenciación entre los tejidos presentes en las imágenes. Los parámetros de adquisición fueron: secuencia 3D-T1-Gradient Recall, TR=12ms, TE=3,47ms, Matriz: 512x512.

Una vez obtenidos los estudios se realizó la segmentación de cada músculo y hueso presentes en las imágenes con la asistencia de un experto médico. Para esto se utilizó un algoritmo de segmentación semiautomática novel, que emplea la teoría de caminos mínimos, el cual fue desarrollado en el marco de esta tesis [6, 8, 9, 10, 11, 12].

A partir de la segmentación de las imágenes se obtuvo la región de cada corte de cada músculo y se evaluó la posición del centroide como un promedio simple de todas las posiciones interiores de ese músculo. Con los centroides calculados para las regiones que representan el recorrido de un músculo desde su punto de origen hasta su punto de inserción, se determinó el polinomio que mejor representa el recorrido de cada músculo segmentado. Con el objetivo de determinar el orden del polinomio que representa en forma óptima el camino muscular, se obtuvieron los polinomios desde orden 3 hasta orden 10 y se calculó el error obtenido para cada uno de ellos [1, 3, 4].

Con el fin de que los parámetros biomecánicos obtenidos en esta tesis puedan ser utilizados por otros grupos de trabajo, se realizó la referenciación de estos a sistemas coordenados locales sugeridos por la sociedad internacional de biomecánica. Asimismo,



**Universidad Nacional  
de Entre Ríos**

Doctorado en Ingeniería  
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ciencias de la  
Alimentación e Ingeniería

se normalizó su ubicación a partir de longitudes comúnmente medidas y utilizadas en los laboratorios de análisis del movimiento para la resolución de los modelos de segmentos articulados.

## **Resultados y Conclusiones**

En esta tesis se logró segmentar 36 músculos en cada miembro inferior de un conjunto de cinco sujetos sin patologías óseo-musculares conocidas. Esta segmentación se realizó con la ayuda de un algoritmo semi-automático desarrollado en el marco de esta tesis. Si bien la cantidad de interacción necesaria de parte del experto médico para realizar la segmentación del estudio completo es considerablemente menor utilizando el algoritmo desarrollado respecto a la segmentación manual, se podrían plantear o implementar nuevos algoritmos semi-automáticos o automáticos que reduzcan aún más la interacción por parte del experto médico. Es importante anotar que los datos obtenidos de la segmentación realizada con el algoritmo aquí generado pueden ser utilizados como juegos de entrenamiento necesarios para la implementación de algoritmos heurísticos de mayor nivel de autonomía para la segmentación de imágenes [2, 5, 7]

Los datos antropométricos presentados en esta tesis pueden ser utilizados en la simulación de MGE, con la ventaja de utilizar parámetros estimados sobre sujetos *in vivo*. Por esta razón los datos presentados han sido normalizados respecto a longitudes medibles entre marcadores externos comúnmente utilizados en el ámbito de trabajo de los laboratorios de marcha. Con esto se logra que la ubicación de los puntos de origen e inserción y los recorridos musculares puedan ser determinados para un nuevo sujeto de prueba, reescalando los datos aquí presentados con las longitudes y ubicaciones de marcadores propias de este nuevo sujeto. Se espera que el reescalado generado mejore los resultados obtenidos a partir de la utilización de datos obtenidos de especímenes cadavéricos, que se utiliza en la actualidad en la mayoría de los MME.

Si bien, a partir de la segmentación realizada se obtienen las áreas completas de origen o inserción, se presentan como puntos efectivos promedios de estas áreas debido a que el objetivo de este trabajo es que los datos aquí publicados puedan ser utilizados en la mejora de la simulación de MMG. Estos modelos utilizan este tipo de simplificación como un punto para la representación de los orígenes e inserciones musculares. Asimismo, se dispone de las áreas de origen e inserción que pueden ser utilizados en la simulación de modelos basados en elementos finitos o representar en un MMG con más de un punto de origen o inserción para la representación de diferentes músculos.

Se presentan los coeficientes de los polinomios de tercer grado que describen el recorrido muscular de los músculos segmentados. La determinación del grado del polinomio se basa en que con este es posible describir con buena precisión el recorrido del músculo con un nivel de complejidad bajo. El uso de otras técnicas de ajuste de curvas como los splines o Polinomios de más alto grado no sería adecuado para este tipo de aplicaciones.



## Publicaciones

- [1] MARCO ANTONIO LÓPEZ IBARRA; ARIEL BRAIDOT. In vivo obtention of paths and origin-insertion points of the lower limb muscles for scaling musculoskeletal models. En proceso presentación.
- [2] DUILIO DEANGELI JUAN CRUZ GASSO LONKAN; MARCO ANTONIO LÓPEZ IBARRA. "Automatic tissue segmentation of lower limb MRI using autoencoders". En Anales del 22 Congreso Argentino de Bioingeniería y 11 Jornada de Ingeniería Clínica, Uruguay: Sociedad Argentina de Bioingeniería. 2020.
- [3] MARCO A. LOPEZ; ARIEL BRAIDOT; ANIBAL SATTTLER; CLAUDIA SCHIRA. Obtención de orígenes e inserciones musculares in-vivo a partir de la segmentación semi-automática de imágenes de resonancia magnética. Primeras Jornadas de Ciencia, Técnica y Arte, Paraná, 3 y 4 de Octubre de 2018.
- [4] MARCO A. LOPEZ; ARIEL BRAIDOT; DANIEL VERA; ANIBAL SATTTLER; CLAUDIA SCHIRA; ERNESTO URIBURU. Reconstrucción de volúmenes musculares a partir de la segmentación semi-automática de imágenes de resonancia magnética para el análisis biomecánico. Presentado y publicado en las memorias del Congreso Nacional en Ciencias de la Vida y la Salud, Paraná, 12 y 13 de noviembre de 2015.
- [5] MARCO A. LOPEZ; ARIEL BRAIDOT; DANIEL VERA; ANIBAL SATTTLER; CLAUDIA SCHIRA; ERNESTO URIBURU. An evolutionary algorithm for the segmentation of muscles and bones of the lower limb. Marco A. Lopez, Ariel Braidot, Anibal Sattler, Claudia Schiram, Ernesto Uriburu. Aceptado para publicación en Journal of Physics: Conference Series. 20th Argentinean Bioengineering Society Congress 2015.
- [6] MARCO A. LOPEZ; ARIEL BRAIDOT. Shortest Path Algorithm for Obtaining Muscular Anthropometric Data from MRI. Publicado en: American Journal of Biomedical Engineering. Rosemead: Scientific & Academic Publishing. 2015 vol.5 n°1. Pag: 15 - 23. issn: 2163-1050. eissn: 2163-1077.
- [7] MARCO A. LOPEZ; ARIEL BRAIDOT; ANIBAL SATTTLER; CLAUDIA SCHIRA. Analysis and Selection of Operating Parameters of an Evolutionary Algorithm for Muscle and Bone Segmentation. Publicado en: IFMBE Proceedings: VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014. 2015 vol 49, Pag: 449-452. issn: 1680-0737.
- [8] MARCO ANTONIO LÓPEZ IBARRA; ARIEL BRAIDOT; GUSTAVO RAICHHOLZ. Segmentación de Músculos Esqueléticos en Imágenes de Miembro Inferior. Publicado en: Proceedings Congreso Peruano de Ingeniería Biomédica Bioingeniería Biotecnología y física médica. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2013, Pag: 195-199. isbn: 978-612-4057-96-0.
- [9] MARCO ANTONIO LÓPEZ IBARRA; ARIEL BRAIDOT; GUSTAVO RAICHHOLZ. Obtención de origen e inserción de músculos del miembro inferior a partir del procesamiento de imágenes de Resonancia Magnética. Publicado en: Proceedings XIX Congreso Argentino de Bioingeniería y VIII Jornadas de Ingeniería Clínica. Sociedad Argentina de Bioingeniería. San Miguel de Tucumán. 2013, isbn: 978- 987-23950-8-7.
- [10] MARCO ANTONIO LÓPEZ IBARRA; ARIEL BRAIDOT; GUSTAVO RAICHHOLZ. Segmentación de imágenes de miembro inferior. Publicado en: Revista Argentina de Bioingeniería.: Sociedad Argentina de Bioingeniería. 2012 vol.18 n°2. Pag: 3 - 9. issn 0329-5257.
- [11] MARCO ANTONIO LÓPEZ IBARRA; ARIEL BRAIDOT. Segmentación SemiAutomática de Imágenes Médicas Basada en un Algoritmo de Caminos Mínimos. Publicado en: Proceedings Terceras Jornadas Chilenas de Ingeniería Biomédica. Departamento de Ingeniería Biomédica, Universidad de Valparaíso. Chile. Valparaíso. 2012.
- [12] MARCO ANTONIO LÓPEZ IBARRA; ARIEL BRAIDOT. Algoritmo de segmentación de imágenes para generar modelos músculo esqueléticos. Publicado en: Proceedings Jornada. XIV Jornadas Internacionales de Ingeniería Clínica y Tecnología Médica. Grupo de Estudios en Ingeniería Clínica. Argentina. Paraná. 2012. isbn: 978-950-698-295-9.