

# Biomodelado de los componentes del oído medio humano haciendo uso de imágenes de resonancia magnética

Adolfo López-Liévano<sup>1</sup>

Daniel Ramón López-Liévano<sup>1</sup>

Hernando Efraín Caicedo-Ortiz<sup>2</sup>

Alejandro González-Rebattú<sup>3</sup>

Mauricio González-Rebattú<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Químicas.

Av. Universidad km 7.5, Coatzacoalcos,

CP 96538, Veracruz.

MÉXICO.

<sup>2</sup>Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingeniería.

Calle 5 núm. 3-85, CP 190009, Popayán.

COLOMBIA.

<sup>3</sup>Instituto de Seguridad y Servicios Sociales

de los Trabajadores del Estado

Hospital Regional "1° de Octubre".

Av. Instituto Politécnico Nacional 1669,

Col. Lindavista, CP 07300, Ciudad de México.

MÉXICO.

correo electrónico (email): k\_lievano@hotmail.com

danielopez@uv.mx

hecaicedo@gmail.com

Recibido 02-06-2016, aceptado 27-10-2016.

## Resumen

En este trabajo se realiza el biomodelado de los elementos que componen el oído medio, el cual incluye el sistema tímpano-cadena oscicular (martillo, yunque y estribo) así como los ligamentos: anterior maleal, superior maleal e incudal posterior y, por último, las juntas o articulaciones incudomaleal e incudo-estapedial. Un aspecto de suma importancia en cuanto al desarrollo de modelos en elementos finitos, es sin duda, la exactitud de la geometría que se pretenda analizar respecto al modelo real, más aun si se trata de modelar los diferentes mecanismos y partes del cuerpo humano; es por tal motivo que en este trabajo se realiza una metodología de

biomodelado, el cual toma como punto de partida la obtención de imágenes de una resonancia magnética del oído medio, posteriormente, por medio de diferentes softwares de diseño (Solidworks), así como de reconstrucción de imágenes (IrfanView, ScanIP) se genera el modelo sólido virtual y, también, se aplican filtros para refinar o eliminar imperfecciones propias del biomodelado. Por último, el biomodelo se valida con datos geométricos de trabajos publicados en la literatura abierta. A este respecto, se constató que el presente modelo tiene una variación de alrededor del 21% respecto a los datos consultados en la literatura; sin embargo, se sabe que la anatomía del oído humano varía de acuerdo al género, al fenotipo y a la edad. En conclusión, este trabajo aporta un modelo del oído medio bastante fiel, que sirve como la base para modelar diferentes patologías con relativa facilidad, aportando así información vital al campo de la medicina.

**Palabras clave:** oído medio, huesillos, elemento finito, tímpano.

## Abstract (Biomodeling of Components of the Human Middle Ear Using Magnetic Resonance Imaging)

In this work the biomodelation of the elements that compose the middle ear is performed, which includes the tympanum-ossicular chain (Malleus, Incus and Stape) as well as the ligaments: anterior maleal, superior maleal and posterior incudal; And finally, the incudomaleal and incudo-stapedial joints. A very important point in the development of finite element models, is undoubtedly the accuracy of the geometry to be analyzed with respect to the actual model, even more if it is about modeling of the different mechanisms and parts of the human body; it is for that reason that in this work a methodology of biomodeling is realized, which takes as a starting point, magnetic resonance imaging of the middle ear, subsequently, by means of different design programs (SolidWorks), as well as reconstruction of images (IrfanView, ScanIP) the virtual solid model is generated, and filters are also applied to refine or eliminate imperfections of the biomodeling. Finally, the model is validated with geometric data published in the open literature. In this respect, it is verified that the present model has a variation of about 21% with respect to the data consulted in the literature; however, it is known that the anatomy of the human ear varies according to gender, phenotype and age. In conclusion, this work provides a very precise middle ear model, which serves as the basis for modeling different pathologies with relative ease, and which provides vital information to the field of medicine.

**Index terms:** middle ear, tympanic membrane, finite element.

## 1. Introducción

Los osículos auditivos (martillo, yunque y estribo) y la membrana timpánica es el sistema mecánico, que es responsable de la transmisión de sonido desde el exterior hasta el oído interno. El proceso de audición comienza en la membrana timpánica, que recibe el ruido de fuera y esto hace que la membrana vibre, estas vibraciones se transmiten a través de los huesecillos, martillo, yunque y estribo. El último es responsable de la transferencia de las vibraciones a la ventana oval del oído interno (véase Fig. 1).

La creación de un modelo 3D preciso del oído medio, es crítico para la comprensión de su funcionamiento y su comportamiento biomecánico debido a que su geometría es de dimensiones muy pequeñas. Por ejemplo, el estribo es el hueso más pequeño del cuerpo humano: su longitud es de menos de 3 mm y su peso es aproximadamente de 2 y 3 mg (Tae-Soo A y col).

En este sentido, trabajos similares se han desarrollado, tal es el caso de Rolando Ruíz Muñoz [1], que realizó el diseño de prótesis personalizada de cadera para paciente con coxartrosis unilateral, en el que se valió de tomografías axiales computarizadas de un paciente para construir el modelo mediante herramientas computacionales. Por otra parte, Espinal Gutiérrez [2] llevó a cabo la evaluación biomecánica de la integridad estructural en dientes molares, en donde de igual manera utilizó tomografías computarizadas para realizar el parametrizado de su modelo numérico, y sobre esta línea también se pueden encontrar los trabajos de Camacho *et al.* [3], Martínez *et al.* [4], Beltrán *et al.* [5], Hernández *et al.* [6],

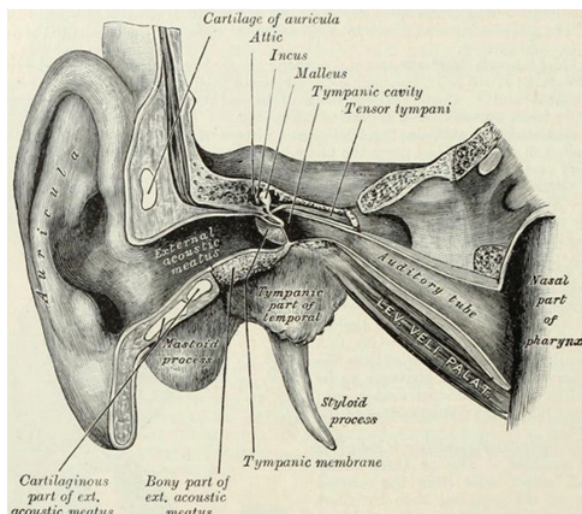


Fig. 1. Estructura del oído medio humano (Warren & Gray, 1918; en [1]).

Urriolagoitia *et al.* [7], Campos *et al.* [8], Rangel *et al.* [9], así como Moreno Garibaldi [10].

## 2. Desarrollo y campo teórico

### 2.1. Imagen de resonancia magnética (RM)

La resonancia magnética es un método comúnmente utilizado para producir imágenes seccionales en seres humanos para el diagnóstico de problemas médicos. Se basa en la detección y el análisis de energía de resonancia magnética a partir de puntos específicos en un volumen de tejido y la posterior construcción de imágenes en escala de grises. Las imágenes digitales de elementos de imagen en 2D se denominan píxeles; en la RM, donde son tratados pequeños volúmenes, los píxeles tienen tres dimensiones y se llaman *voxels*. Cuando se ve en una pantalla de ordenador aparecen como píxeles en 2D, pero su naturaleza 3D puede ser fácilmente apreciada cuando se reconstruye el volumen en planos diferentes, es aquí donde recae la utilidad del programa ScanIP, pues se ayuda de los *voxels* para modelar los elementos en 3D (véase Fig. 2).

El proceso de biomodelado del oído medio comienza por la obtención de imágenes de una resonancia magnética de un cadáver humano, que fue facilitada por los doctores O.W. Henson, Jr. y Miriam Henson de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Es necesario descompactar la resonancia magnética en un formato compatible, para lo cual se ocupó el software IrfanView 4.0, que es de licencia libre. El formato elegido fue JPG, y el proceso de diseño del modelo comienza por importar las imágenes de resonancia magnética en el programa ScanIP, como se ilustra en la Fig. 2.

### 2.2. Parametrización del modelo

Una vez integrada en el programa ScanIP las imágenes de la resonancia, es importante especificar las dimensiones del

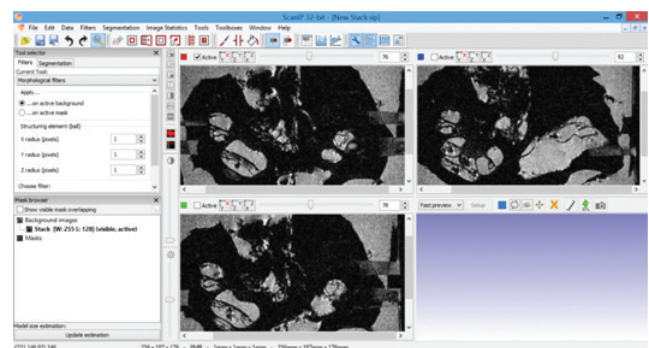


Fig. 2. Importación de las imágenes de resonancia magnética en el programa ScanIP.

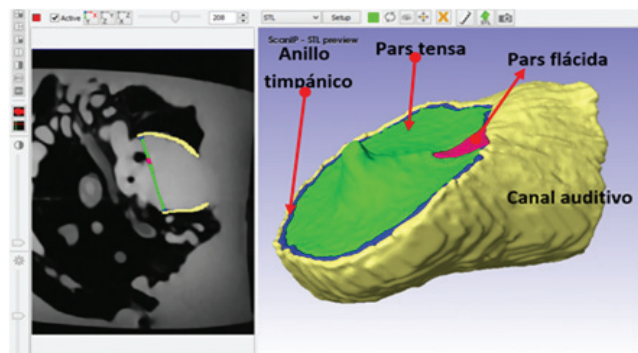
volumen de la misma en las tres direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . En este sentido la resonancia magnética que se utilizó en este trabajo contiene 340 cortes, con una resolución de 489 píxeles de ancho y 366 píxeles de largo. Una vez especificada esta información, el programa será capaz de reproducir la resonancia magnética dentro de su interfaz y así poder comenzar la generación del modelo en 3 dimensiones.

La metodología de creación del modelo en 3 dimensiones consiste en la creación de los elementos que componen el oído medio y que a continuación se enuncian. La forma más conveniente de trabajar en el programa ScanIP es en capas, es decir, construir el oído medio en sus elementos separados y en diferentes capas de colores, para después exportarlos al programa de elemento finito y ensamblarlo, asignando los correspondientes tipos de contactos, lo cual se describe a continuación.

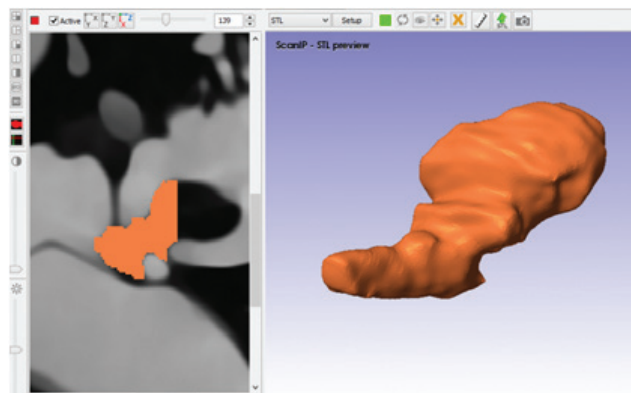
### 2.3. Metodología para la obtención del modelo en 3D

A continuación, se enuncian los elementos que componen al oído medio y que son modelados por medio del programa ScanIP:

- Canal auditivo
- Anillo timpánico
- Tímpano (pars flácida)
- Tímpano (pars tensa)
- Martillo
- Junta incudomaleal
- Yunque
- Junta incudo estapedal
- Estribo
- Ligamento superior maleal
- Ligamento anterior maleal
- Ligamento posterior incudal



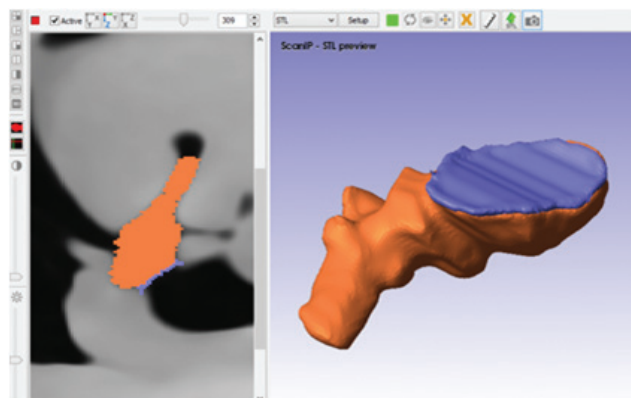
**Fig. 3.** Ilustración del canal auditivo, anillo timpánico y el tímpano (pars flácida y pars tensa).



**Fig. 4.** Construcción del martillo en el programa ScanIP.

En la Fig. 3 se muestra la construcción del canal auditivo. Es importante señalar que debido a las características de la resonancia magnética, solo se construyó la mitad del canal auditivo aproximadamente. Para reconstruir la forma del canal auditivo se utilizó la herramienta Confidence, ya que la tonalidad de blancos del área del canal auditivo estaba muy bien definida; también se utilizó la herramienta Paint para refinar las capas más oscuras que fueron capturadas por la herramienta Confidence. En la Fig. 4 se puede observar la construcción del martillo.

En la Fig. 5 se puede apreciar el modelado de la junta incudomaleal. Dicha junta, que funciona como articulación, es de suma importancia, ya que tiene propiedades mecánicas diferentes a la de los huesos y, al no ser un elemento rígido, es importante asignar de manera adecuada el tipo de contacto unión entre la junta y los huesos que une.



**Fig. 5.** Construcción de la junta incudomaleal en ScanIP.



En las figuras 6, 7 y 8 se puede apreciar la construcción del Yunque, junta incudo-estapedial así como el estribo, respectivamente.

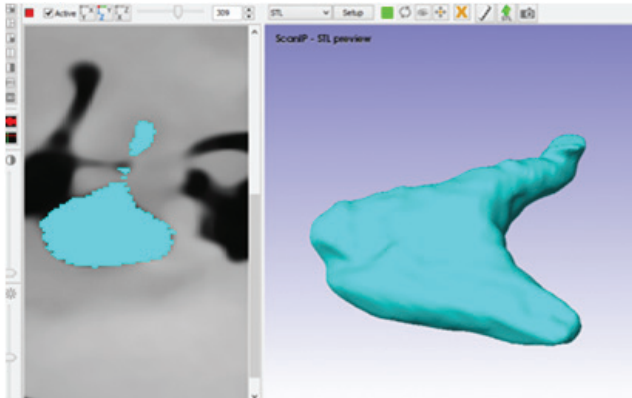


Fig. 6. Construcción del martillo en el programa ScanIP.

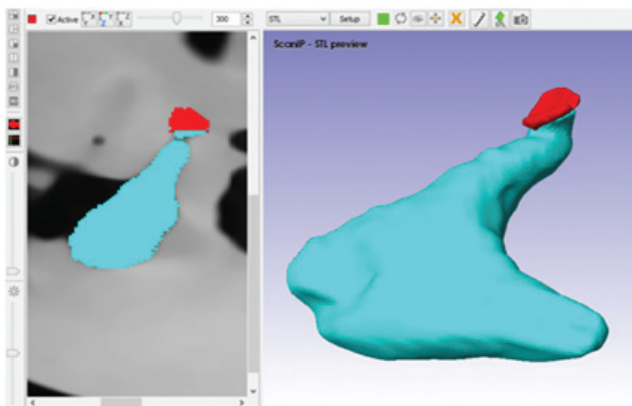


Fig. 7. Construcción de la junta incudoestapedial en el programa ScanIP.

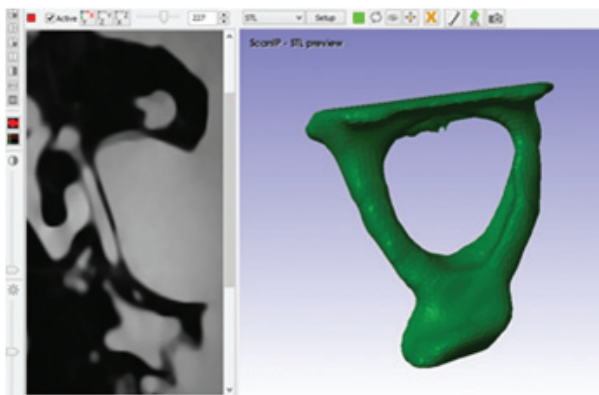


Fig. 8. Construcción del estribo en el programa ScanIP.

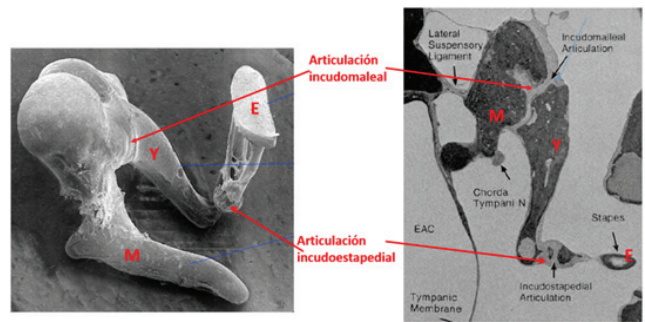
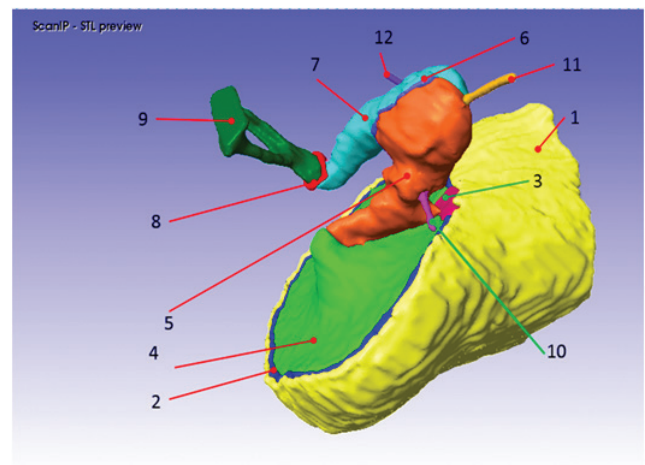


Fig. 9. Vista microscópica de los huesos del oído medio [11].

## 2.4. Ensamble de todos los elementos del oído medio

En la figura 9 y 10, se muestra una comparativa de imágenes entre los huesos de un oído medio real, vistos a nivel microscópico y la imagen del oído medio del presente trabajo.



Número	Elemento
1	Canal auditivo
2	Anillo timpánico
3	Tímpano (pars flácida)
4	Tímpano (pars tensa)
5	Martillo
6	Junta incudomalear
7	Yunque
8	Junta incudoestapedial
9	Estribo
10	Ligamento anterior malear
11	Ligamento superior malear
12	Ligamento posterior icudal

Fig. 10. Modelo definitivo del oído medio en ScanIP.

Por último, para darle mayor validez al modelo, se realizó una comparativa de las dimensiones del presente modelo y de datos publicados en la literatura.

Como se puede observar en la tabla, el diámetro perpendicular del manubrio, en la región del tímpano, el presente modelo

**Tabla 1.** Comparativa de las dimensiones geométricas del modelo respecto a la literatura.

	Presente modelo	Literatura	Diferencia	Referencia
<b>TÍMPANO</b>				
Diámetro a lo largo del manubrio	9.93 mm	8.0-10.0 mm	0 mm	Gray 1918
Diámetro perpendicular al manubrio	10.98 mm	7.5-9.0 mm	1.9 mm	Helmholtz 1863
<b>MARTILLO</b>				
Longitud a lo largo del manubrio	4.18 mm	5.8 mm	1.62 mm	Stuhlman 1937
Tamaño total	6.97 mm	7.6-9.1 mm	0 mm	Bast & Anson 1949
<b>YUNQUE</b>				
Longitud proceso largo	7.8 mm	7.0 mm	0.8 mm	Stuhlman 1937
Longitud proceso corto	6.8 mm	5.0 mm	1.8 mm	Stuhlman 1937
<b>ESTRIBO</b>				
Tamaño	4.27 mm	2.5-4.0 mm	0.27 mm	Stuhlman 1937
Longitud a lo largo de la base del estribo	3.81 mm	2.64-3.36 mm	0.45 mm	Wever 1954
Ancho de la base del estribo	1.33 mm	0.70-1.66 mm	0 mm	Helmholtz 1863

tiene una mayor dimensión en un 21%, lo cual se debe a las diferencias entre individuos de diferentes tipos de género, edad, así como del fenotipo [12].

### 3. Conclusiones

Al término del presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

- Se logró generar un modelo con alto grado de precisión geométrica, a partir de técnicas de reconstrucción de imágenes.
- Se pudo validar el modelo a partir de los datos publicados en la literatura.
- A partir de la construcción de un modelo fiel del oído medio, es posible generar un modelo por medio del elemento finito para análisis numéricos de diferentes fenómenos mecánico-acústicos.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

### Referencias

- [1] Y. Espinal Gutiérrez, "Evaluación biomecánica de la integridad estructural en dientes molares," Tesis de Maestría, Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2011.
- [2] N. Camacho, J. A. Beltrán, M. González, L. H. Hernández P. Moreno, G. Urriolagoitia, & D. López, "Numerical study in biomodels of maxillofacial prosthesis (Cancer and osteonecrosis cases). Design and Computation of Modern Engineering Materials," en *Design and Computation of Modern Engineering Materials*, A. Öchsner y H. Altenbach (Eds.), pp. 59-72, Springer International Publishing, Suiza, 2014.
- [3] J. Martínez, J. A. Beltrán, M. González, L. H. Hernández, & A. I. Rangel, "Reconstrucción de fosa ocular con prótesis de hidroxiapatita y malla de titanio," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 6, núm 1, pp. 53-60, agosto 2014.
- [4] J. A. Beltrán, D. López, L. H. Hernández, G. Urriolagoitia, & M. González, "Numerical and biomechanical testings in cadaveric auditory ossicles using computer axial tomography," En *Applications of Computational Tools in Biosciences and Medical Engineering*, A. Öchsner y H. Altenbach (Eds.), pp. 61-71, Springer International Publishing, Suiza, 2014.
- [5] L. H. Hernández, D. López, J. A. Beltrán, M. González, G. Urriolagoitia, R. Rodríguez, & N. Camacho, "Design and Manufacture of a Prototype of a Testing Rig for the

- Evaluation of the Biomechanical Behavior of Vertebrae," en *Design and Computation of Modern Engineering Materials*, A. Öchsner y H. Altenbach (Eds.), pp. 121-134, Springer International Publishing, Suiza, 2014.
- G. Urriolagoitia-Calderón, G. Urriolagoitia-Sosa, L. H. Hernández, E. A. Merchán, M. Vite, C. V. Fera, & J. A. Beltrán, "Análisis del desgaste de la articulación cabeza femoral-copa acetabular mediante simulación experimental con máquina perno-disco," *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 10, núm 1, pp. 94-110, 2008.
- [7] J. I. Campos-López, A. Fuerte-Hernández, L. H. Hernández-Gómez, A. Martínez-García, J. A. Beltrán-Fernández, & G. Urriolagoitia-Calderón, "Determination of the mechanical properties of lumbar porcine vertebrae with 2D digital image correlation," *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, vol. 13, núm. 3, pp. 195-200, octubre 2015.
- [8] A. Rangel-Elizalde, J.A. Beltrán-Fernández, L.H. Hernández-Gómez, A. González-Rebatú, J. Martínez-Paredes, & L.M. Valverde-Cedillo, "Diseño de un tornillo corpóreo como dispositivo auxiliar en el tratamiento de alteraciones en la columna vertebral," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 6, núm. 1, pp. 47-52, agosto 2014.
- [9] P. Moreno Garibaldi, "Diseño y manufactura de una prótesis de maxilar inferior para pacientes con anquilosis temporomandibular lateral," Maestría en Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2014.
- [10] M. Ferrazzini, "Virtual middle ear: dynamic mathematical model based on the finite element method," Phd Thesis at Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2013.
- [11] Rong Z. Gan, Bin Feng, & Qunli Sun, "Three-dimensional finite element modeling of human ear for sound transmission," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 32, núm. 6, pp. 847-859, junio 2004.
- [12] H. Fastl, & E. Zwicker, *Psycho-acoustics: Facts and Models*. Springer, 2007.

## BIBLIOGRAFÍA LATINOAMERICANA

### en revistas de investigación científica y social

## BIBLAT

Portal especializado en revistas científicas y  
académicas publicadas en América  
Latina y el Caribe

<http://biblat.unam.mx/es/>