

Modelos de simulación para entrenamiento en cirugía de hueso temporal

Temporal bone surgery simulation-training models

Macarena Viñuela M.¹, Valeria Sepúlveda C.^{2,3}, Andrés Rosenbaum F.³, Antonia Lagos V.³

Resumen

El fresado de hueso temporal (HT) es un desafío para los otorrinolaringólogos. Este procedimiento requiere un conocimiento detallado de esta zona anatómicamente compleja y un dominio de la técnica quirúrgica. La exposición a una mastoidectomía simple o mastoidectomía radical varía entre residentes y distintos programas de especialidad y, frecuentemente, no se cumple el número requerido para la curva de aprendizaje durante la formación. Por lo anterior, surge la necesidad de realizar simulación quirúrgica de fresado de HT. El *gold standard* para su entrenamiento son los modelos cadavéricos, sin embargo, su costo y baja disponibilidad representan una limitación importante. Los modelos de simulación no cadavéricos podrían jugar un rol importante en el entrenamiento de esta cirugía. Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura sobre los modelos de simulación disponibles en fresado de HT. Se encontraron estudios sobre modelos cadavéricos, basados en impresión 3D, realidad virtual y de bajo costo. Los modelos de impresión 3D y realidad virtual han sido evaluados favorablemente en cuanto a adquisición de habilidades, aprendizaje de anatomía, similitud con modelos cadavéricos y sensación táctil. Los modelos de impresión 3D presentan mayor fidelidad anatómica y física, pero tienen un mayor costo. En suma, se han desarrollado modelos de fresado de HT no cadavéricos que cuentan, principalmente, con validez de apariencia y contenido, y solo algunos con validez de constructo. Se necesitan más estudios para evaluar su validez predictiva y transferencia de habilidades al paciente real.

Palabras clave: fresado hueso temporal, mastoidectomía, simulación, impresión 3D, realidad virtual.

Abstract

Temporal bone (TB) dissection is a challenging procedure for otolaryngologists. It requires a detailed knowledge of this anatomically complex area and mastery of the surgical technique. Exposure to a simple or radical mastoidectomy may vary among residents and specialty programs, frequently not complying with the required number of surgeries to complete the learning curve during residency. Hence, TB dissection simulation is of great importance. The gold standard for simulated training are cadaveric models, nevertheless, the associated high cost and low availability represent a major limitation for this modality. Non-cadaveric simulation models could play a key role in simulated training for this surgery. A comprehensive review of the literature regarding the available simulation models for TB dissection was conducted. Articles for cadaveric, 3D-printed, virtual reality and low-cost models were identified. 3D-printed and virtual reality models have been favorably evaluated in terms of skill acquisition, anatomy learning, similarity to cadaveric models, and tactile sensation. 3D-printed models present superior anatomic and physical fidelity, but are more expensive. In sum, the current non-cadaveric models for TB dissection mostly present face and content validity, while few models count with construct validity. Further studies are required to assess predictive validity and skill transfer to the real patient.

Keywords: temporal bone dissection, mastoidectomy, simulation, 3D printing, virtual reality

¹Escuela de Medicina, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

²Centro de Cirugía Experimental y Simulación. Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

³Departamento de Otorrinolaringología, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Recibido el 19 de marzo de 2022. Aceptado el 22 de abril de 2022.

Correspondencia
Antonia Lagos V.
Diagonal Paraguay 362
Pontificia Universidad Católica de Chile.
Santiago, Chile.
Email: aelagos@uc.cl

Introducción

El aprendizaje de otorrinolaringología (ORL) como especialidad médico-quirúrgica requiere práctica y perfeccionamiento de las técnicas en cirugía. Dentro de ellas, el fresado de hueso temporal (HT) es una de las más complejas. El HT se encuentra en una zona anatómica de difícil acceso y rodeada de estructuras importantes en espacios reducidos. Además, presenta variabilidad anatómica entre pacientes y puede sufrir cambios impredecibles secundarios a sus patologías¹. El fresado de HT es el paso fundamental transversal a varias cirugías otológicas y otoneurológicas, incluyendo la mastoidectomía simple, mastoidectomía con ático-antrotomía abierta o cerrada, timpanotomía posterior para implante coclear, laberintectomía, cirugía de saco endolinfático, acceso a tumores de ángulo ponto-cerebeloso, entre otras. Los riesgos asociados incluyen lesiones del nervio facial, hipoacusia, fistula de líquido cefalorraquídeo, fistula laberíntica y lesión del seno sigmoideo. De esta forma, se requiere de un conocimiento anatómico detallado y el desarrollo exhaustivo de la técnica quirúrgica, lo cual requiere horas de preparación y la guía de un cirujano otólogo experimentado².

La curva de aprendizaje del fresado de HT varía entre individuos. Sin embargo, para lograr un nivel adecuado se requiere, en promedio, de nueve procedimientos para una mastoidectomía simple y diez procedimientos para una mastoidectomía radical modificada³. Los programas de residencia son heterogéneos y, por lo tanto, no se puede asegurar que los residentes obtengan un número suficiente de exposición a esta técnica durante la formación, que en Chile corresponde a tres años. Esto, sumado al aumento del número de residentes por año, la incorporación de leyes sobre la restricción de su horario laboral, la necesidad de una atención segura al paciente, y la subespecialización con consecuente complejización de procedimientos mínimamente invasivos que deben ser enseñados, además de los tradicionales, han llevado a una disminución en la exposición a cirugías durante la residencia y a la búsqueda de otras estrategias educacionales⁴. De acuerdo con la Agencia Acreditadora de Programas de Postgrado de

Especialidades en Medicina y Centros Formadores de Médicos Especialistas (APICE), se recomienda que los residentes cumplan un número de cirugías establecidos a partir de las bases establecidas por la Sociedad Chilena de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello (SOCHIORL). Un estudio de la Universidad de Chile evaluó el número y tipo de cirugías realizadas por sus residentes de ORL entre 2006 y 2016. Sus resultados muestran que los residentes realizan un 37,3% de los 11 procedimientos propuestos por APICE. Específicamente, el porcentaje de cumplimiento de la mastoidectomía es de un 45,5% de los ocho procedimientos recomendados por APICE⁵. Por otra parte, la pandemia de COVID-19 ha afectado, negativamente, la exposición de los residentes a pacientes y procedimientos quirúrgicos.

Por todo lo anterior, se han debido buscar estrategias educacionales complementarias, tomando importancia la simulación para mejorar la adquisición de habilidades prácticas y entrenar los procedimientos quirúrgicos previo a la exposición al paciente real. La simulación quirúrgica ha demostrado disminuir la curva de aprendizaje de procedimientos complejos en un contexto seguro y eficiente⁴. Asegurar la validez de un programa de entrenamiento de simulación es crucial para favorecer la adquisición de conocimientos y habilidades. La literatura describe distintos niveles de validez: la validez de apariencia, que consiste en la evaluación subjetiva de expertos respecto a la pertinencia del instrumento; la validez de contenido, que se refiere a la relación entre el contenido de una evaluación y el objetivo para el que fue diseñado; la validez de constructo, que es la capacidad de diferenciar distintos niveles de desempeño con el instrumento, y por último, la validez predictiva, que corresponde a la capacidad del modelo de transferir conocimientos o habilidades a otro escenario más complejo o al paciente real⁶. El objetivo de esta revisión es presentar los modelos de simulación disponibles en la literatura, para entrenamiento de procedimientos quirúrgicos de HT.

Los artículos fueron identificados por búsqueda electrónica usando las siguientes bases de datos: *The Cochrane Library*, *MEDLINE*, *PubMed*, y *SciELO*. La estrategia de búsqueda

para todas las bases de datos fue: “*temporal bone drilling*” OR “*temporal bone reaming*”, AND “*simulation*” OR “*simulation-based training*”, desde el comienzo hasta diciembre de 2021. Los artículos se limitaron al lenguaje español e inglés (fecha de búsqueda 15 de diciembre de 2021).

Modelo de simulación de fresado de hueso temporal

Modelos cadavéricos

Tradicionalmente, el entrenamiento del fresado de HT se ha realizado usando modelos cadavéricos, considerándose el *gold standard*^{2,7}. Una revisión bibliográfica buscó evaluar la utilidad de modelos cadavéricos en fresado de HT, concluyendo que el entrenamiento en cadáveres humanos replica la experiencia de forma más fidedigna que otros tipos de modelos de simulación sintética o cadavérica de origen animal debido a la alta fidelidad anatómica⁷. Sin embargo, se han identificado limitaciones, tales como problemas de carácter legal, ético-religioso, riesgos inherentes a la exposición de material biológico, falta de diversidad de las muestras y costos.

Modelos de impresión 3D

El uso de impresión 3D es una alternativa a los modelos cadavéricos para la práctica de fresado de HT. Son creados mediante fabricación aditiva, basados principalmente en tomografías computadas (TC) de HT de adultos vivos o cadavéricos⁸⁻¹¹. Se pueden imprimir estructuras en distintos materiales y colores que permiten simular la anatomía normal y patológica muy detallada⁸. Se encontraron 14 artículos científicos referentes a modelos de impresión 3D para fresado de HT, de los cuales ocho fueron evaluados por especialistas, cinco por residentes de ORL y uno no tuvo evaluación. Los modelos y su nivel de validación se encuentran detallados en la Tabla 1.

La gran mayoría de los modelos cuenta con validez de apariencia, algunos con validez de contenido, y ninguno con validez de constructo o validez predictiva. Cuatro estudios compararon el fresado de HT usando un mo-

delo de impresión 3D versus uno cadavérico, encontrando alta fidelidad anatómica y de sensación táctil entre ambos modelos, así como en la calidad del fresado^{9,12-14}.

Los modelos de impresión 3D demostraron ser útiles como herramienta de entrenamiento para fresado de HT^{9,12-20} y similares a uno cadavérico^{9,12,13,15,17-22}. Algunos de los estudios en que los modelos fueron evaluados por residentes de ORL, indicaron que estos deberían ser integrados al currículum formativo debido a su valor educacional y que mejoran su confianza a la hora de realizar el procedimiento^{9,12,13,17}.

En 2018, la Academia Americana de ORL y Fundación de Cirugía de Cabeza y Cuello (AAO-HNSF) creó un grupo de trabajo de expertos para comparar distintos modelos según su validez de apariencia, analizando la técnica de impresión 3D y los materiales utilizados. Evaluaron su precisión y fidelidad con una encuesta de 15 preguntas de escala de Likert. El grupo concluyó que siete de los 12 modelos evaluados fueron similares a un cadáver humano respecto a fresado, disección, y presentan detalles anatómicos significativos. Los modelos impresos con material de resina estándar usando una impresora de estereolitografía fueron mejor evaluados en general, pero con pequeñas diferencias respecto al resto en varias categorías. La calidad de las imágenes de la TC en las que se basa la impresión, afecta la calidad del modelo⁸.

Una revisión sistemática encontró que, si bien existen varios modelos de impresión 3D disponibles, la evidencia que apoya su uso y el conocimiento respecto a su efecto sobre el desempeño quirúrgico en paciente real es limitada. Esto se debe a que los modelos han sido validados, principalmente, en base a la opinión de expertos o alumnos entrenados¹¹.

Modelos de realidad virtual

Se han elaborado plataformas de simulación virtual en la que el estudiante practica en una pantalla de computador, similar a un videojuego. Éste interactúa con un HT tridimensional utilizando una interfaz táctil para practicar el procedimiento. La imagen utilizada puede provenir de una TC, generando una experiencia similar a un entrenamiento tradicional²³.

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Tabla 1. Modelos de simulación para fresado de hueso temporal de Impresión en tres dimensiones (3D)

Autor	Descripción	Tipo de Validez	Descripción de Validación	Costo
Modelos 3D basados en TC de HT cadavérico				
Okada y cols. 2010 ¹⁰	Modelo 3D basado en TC de HT cadavérico.	Apariencia.	5 otorrinolaringólogos experimentados realizaron una mastoidectomía. Evaluaron el modelo con una encuesta de apariencia y fidelidad. Un 80% consideró al modelo globalmente satisfactorio. Un 60% evaluó la mastoidectomía como satisfactoria, y un 40% como completamente satisfactoria.	ND
Chenebaux y cols. 2014 ¹⁶	Modelo 3D basado en TC de HT cadavérico.	Apariencia.	25 otólogos fresaron el modelo. Lo evaluaron con una escala con puntaje de 0 a 3 (0=pobre, 3=excelente). Evaluaron favorablemente la apariencia anatómica general (2,54±0,50), fresado (2,46±0,58) e identificación de reparos anatómicos (2,39±0,73).	ND
Chien y cols. 2021 ¹⁷	Modelo 3D basado en TC de HT cadavérico existente de <i>Phacon GmbH</i> (Leipzig, Alemania).	Apariencia. Contenido.	17 residentes de ORL realizaron una mastoidectomía, epitimpanectomía, timpanotomía posterior, codeostomía, canaloplastia y resección del HT en el modelo. Lo evaluaron con un cuestionario de 23 ítems con escala de Likert de 5 puntos. Calificaron favorablemente el realismo anatómico (4,0±0,21) y su utilidad como herramienta de entrenamiento (4,65±0,12). Respecto a los procedimientos, la mastoidectomía cortical obtuvo mejor puntaje (4,59±0,12) y la resección del HT el peor (3,33±0,23).	ND
Modelos 3D basados en TC de HT de paciente vivo				
Bento y cols. 2019 ¹⁵	Modelo 3D basado en TC de HT de adulto sano (<i>Otobone®</i>).	Apariencia.	Un otorrinolaringólogo experimentado realizó fresado de HT en 5 de estos modelos. Evaluó su plasticidad y fidelidad anatómica con 4 de 5 puntos en una escala de Likert.	ND
Rose y cols. 2015 ¹⁹	Modelo de HT basado en TC de HT de paciente con colesteatoma recurrente.	Apariencia.	Dos especialistas entrenaron en el modelo del paciente. Luego, durante la cirugía, midieron las distancias anatómicas para evaluar la fidelidad del modelo. Encontraron mínima variabilidad en cuanto a distancia absoluta (0,26 mm) y relativa (2,26%) respecto a los hitos anatómicos.	ND
Mowry y cols. 2015 ²⁰	Modelo 3D basado en TC de HT, con materiales de bajo costo.	Apariencia.	7 otoneurólogos realizaron fresado de HT en el modelo. Evaluaron su fidelidad con una escala de Likert de 4 puntos. El modelo 3D representaba de forma precisa el HT humano y era aceptable como material de entrenamiento para una mastoidectomía cortical (4,29±0,89). Podría ser utilizado como simulador para una cirugía planificada (3,43±0,55).	USD \$1,92*
Comparación de modelo 3D con modelo cadavérico				
Unger y cols. 2014 ⁹	Comparación de modelo 3D con modelo cadavérico.	Apariencia. Contenido.	10 residentes de ORL realizaron una mastoidectomía en un modelo cadavérico y en su modelo de impresión 3D correspondiente. Los evaluaron con una escala de Likert de 7 puntos. Valoraron el modelo sintético como altamente realista comparado con el cadavérico en todos los parámetros evaluados (5,9±0,2), efectivo para el entrenamiento (7,0±0,0), aumentó su confianza para una mastoidectomía (6,9±0,1), y que debería ser integrado en el currículum formativo (7,0±0,0).	ND
Gadaleta y cols. 2020 ¹²	Comparación de modelo 3D con modelo cadavérico.	Apariencia. Contenido.	10 residentes de ORL realizaron una mastoidectomía en el modelo de impresión 3D y luego en un cadavérico. Evaluaron la experiencia con un cuestionario de 10 ítems con una escala de Likert de 5 puntos. Valoraron al modelo 3D como similar al cadavérico en general (4,75±0,72), respecto a su utilidad (4,75±0,35) y seguridad de utilización (4,5±0,97).	USD \$1,50*

Hochman y cols. 2015 ¹³	Comparación de modelo 3D con modelo cadavérico.	Apariencia. Contenido.	10 residentes de ORL realizaron fresado de HT en un modelo cadavérico y luego en el modelo 3D. Los evaluaron con una escala de Likert de 7 puntos. El modelo de impresión 3D fue valorado como similar al cadavérico en general (5,9±0,74), con buena calidad de taladro óseo cortical (5,5±1,5) y trabecular (5,2±1,3), reproducción fidedigna de celdillas (6,1±1,1), y constructos internos satisfactorios (rango 4,9-6,2). Se consideró beneficioso para entrenar todo tipo de mastoidectomía (rango 5,9-6,6), timpanotomía posterior (6,5±0,71) y enfrentamientos quirúrgicos de la base del cráneo (rango 6,0-6,5); como un instrumento de entrenamiento efectivo (6,7±0,88), y debería ser incorporado al laboratorio de HT (7,0±0,0). Mejoró la confianza (6,7±0,68) y desempeño operatorio (6,7±0,48) de los residentes.	ND
Aussedat y cols. 2017 ¹⁴	Comparación de modelo 3D con modelo cadavérico.	Contenido.	34 residentes de ORL fueron divididos en dos grupos; el primero realizó una mastoidectomía exclusivamente en modelos cadavéricos; el segundo trabajó en un prototipo de impresión 3D y luego en uno cadavérico. Se evaluó su desempeño utilizando la escala de Welling modificada y validada, de 25 ítems. El grupo del modelo 3D obtuvo resultados significativamente mejores que el cadavérico (P=0,0007), y en ambos grupos se observó una mejoría significativa en su representación mental de la mastoidectomía (P=0,0003).	ND
Otros				
Rose y cols. 2015 ¹⁸	Comparación de modelos basados en TC de HT de paciente vivo (modelo A) y TC cadavérico (modelo B).	Apariencia.	8 otorrinolaringólogos fresaron el modelo A y 13 el modelo B. Evaluaron cada uno con un cuestionario de 9 ítems con escala de Likert de 5 puntos. La evaluación global del modelo A fue de 4,2 puntos versus 4,3 del modelo B. Ambos fueron similares en cuanto a anatomía, sensación táctil, seguridad y valor para la experiencia quirúrgica.	USD \$400*
Takahashi y cols. 2017 ²¹	Optimización de fidelidad anatómica de un modelo 3D mediante el modelamiento digital.	Apariencia.	20 otorrinolaringólogos realizaron fresado de HT en el modelo. Lo evaluaron con una escala de Likert de 5 puntos. Los cambios implementados brindaron dureza ósea y sensación táctil favorable (4,4±1,14), y buena representación de los reparos anatómicos internos (4,1±0,55).	ND
McMillan y cols. 2020 ²²	Modelo 3D de cinco materiales distintos: acrilonitrilo butadieno (ABS) en impresora MakerBot 2x, polímero fotopolimerizable (Photo) en impresora Objet 350 Connex3, policarbonato (PC) en impresora FDM-Fortus 400 mc, y acrílico fotoreticulable blanco (FLW) y azul (FLB) en impresora Formlabs Form 2.	Apariencia.	4 otoneurólogos, 2 otorrinolaringólogos experimentados y 1 residente de neurocirugía realizaron fresado de HT en 5 modelos 3D de distinto material. Los evaluaron usando un cuestionario de modelo de HT de 1 a 5 puntos. Los modelos PC (2,97±0,89) y Photo (2,94±0,91) fueron mejor evaluados en anatomía considerando contorno, antró, tegmen, cápsula ótica y timpánica. La representación táctil de textura y la calidad del material fueron superiores en FLW (2,75±1,17), PC (2,71±1,11), y Photo (2,64±0,95). La mayoría de evaluadores indicaron que Photo (1,00±0,0), PC (0,85±0,38), y FLW (0,57±0,53) eran apropiados para practicar fresado de HT.	USD \$25* en Objet, USD \$14* en Fortus, USD \$5* en FormLab y USD \$2* en Makerbot
Ahmad y cols. 2014 ⁵⁹	Reconstrucciones digitales en 3D de HT a partir de la colección histológica de HT del University College de Londres (software 3DView version 1.2).	Sin validación.	Sin validación.	ND
TC: tomografía computada; HT: hueso temporal; ORL: otorrinolaringología; ND: no descrito; *costo solo de materiales de impresión 3D, no incluye impresora.				

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Se identificaron 31 artículos científicos originales, 2 revisiones sistemáticas y 1 metaanálisis referentes a modelos de realidad virtual (RV) para fresado de HT. Dos modelos fueron evaluados por especialistas, 5 por residentes, 5 por ambos, 1 por estudiantes de medicina, y 6 no tuvieron evaluación. En los 12 artículos restantes se evaluó el desempeño de participantes de distinto nivel de experticia usando los modelos de simulación. Las características de los modelos y de su validación se encuentran detallados en la Tabla 2.

La gran mayoría de estos modelos cuenta con validez de apariencia y contenido, algunos con validez de constructo, pero ninguno con validez predictiva. Tres artículos presentaron modelos de RV sin fines educacionales quirúrgicos de simulación y, por ende, sin validación para cirugía. Kockro y cols. crearon un modelo usando los datos del *Visible Human Project* de la Biblioteca Nacional de Medicina de Estados Unidos, que permite estudiar la anatomía del HT y su intervención quirúrgica desde distintos abordajes²⁴. Barber y cols. elaboraron un simulador virtual de sala de pabellón para fresado de HT que simula la cirugía de resección de un schwannoma vestibular con abordaje translaberíntico usando un video estereoscópico²⁵. Otro grupo diseñó un modelo mixto usando tecnología de RV e impresión 3D para mejorar el componente táctil²⁶.

Las revisiones sistemáticas de modelos de RV han mostrado que los participantes que recibieron entrenamiento con modelos de RV tardan menos en completar el procedimiento, tienen mejor desempeño psicomotor y adquieren mayores conocimientos anatómicos en contraste a un grupo de entrenamiento tradicional sin RV^{27,28}, pero la evidencia es limitada para efectuar recomendaciones sobre el uso de modelos virtuales en cirugías otorrinolaringológicas²⁷. Un metaanálisis evaluó el uso de RV en fresado de HT y encontró que el desempeño de una mastoidectomía mejoró significativamente luego del entrenamiento en el simulador ($P = 0,006$)¹.

Los modelos de RV demostraron ser útiles como herramienta de entrenamiento para fresado de HT²⁹⁻⁵² y de aspecto anatómico realista^{29,30,33,35,40-43,46,47}. Algunos residentes de ORL indicaron que los modelos deberían ser

integrados al currículum formativo⁴³ y que mejoran su confianza a la hora de realizar el procedimiento^{43,53}.

Modelos de bajo costo

Meléndez y cols. propusieron un modelo de simulación de fresado de HT utilizando un huevo de gallina. El ejercicio consistió en fresar y disecar la cáscara del huevo, preservando la membrana natural de ésta. Este modelo permitiría practicar el fresado de HT y mejorar el control de los instrumentos requeridos para esta cirugía de forma costo-efectiva. Sin embargo, no contribuye al aprendizaje de la anatomía del HT ni se encuentra validado⁵⁴.

Discusión

Los modelos de simulación para entrenamiento en fresado de HT encontrados en la literatura hasta la fecha son una herramienta de enseñanza útil y valiosa para desarrollar habilidades. Han surgido a partir de la necesidad de entrenar a las generaciones de futuros especialistas que requerirán entrenamiento exhaustivo en la técnica de fresado de HT. Por lo mismo, existen esfuerzos a nivel global con el fin de elaborar y perfeccionar modelos de entrenamiento fidedignos.

Globalmente, se ha visto una disminución en la exposición a cirugías de los residentes, y asimismo una disminución en su percepción de autonomía quirúrgica al egresar⁵⁵. Esto se vio agravado en el contexto de la pandemia de SARS-CoV-2, demostrado por un estudio de Álvarez y cols. que evaluó su impacto en residentes de ORL chilenos. Describen que un 62% de los residentes no participó en ninguna cirugía durante abril de 2020, y dentro de las herramientas educacionales complementarias en ese período, solo un 17% participó de actividades de simulación⁵⁶.

Por otra parte, la disponibilidad de especímenes de modelos cadavéricos ha disminuido drásticamente a nivel mundial mientras que el número de residentes de ORL ha aumentado, limitando su exposición^{39,57}. Una fuente de donantes cadavéricos consiste en fallecidos no identificados. Sin embargo, dependiendo de las leyes locales, estos pueden ser donados a la ciencia treinta días después del fallecimiento.

Tabla 2. Modelos de simulación para fresado de hueso temporal de realidad virtual (RV)				
Autor	Descripción	Tipo de Validez	Descripción de Validación	Costo
Modelos RV de universidades o disponibles en el mercado				
Compton y cols. 2020 ²⁹	Plataforma virtual de HT <i>CardinalSim</i>	Apariencia. Contenido.	32 otorrinolaringólogos y 30 residentes de ORL realizaron una mastoidectomía cortical y timpanotomía posterior. Lo evaluaron con un cuestionario de 13 ítems con escala de Likert de 5 puntos. La apariencia fue considerada realista en 5 de 7 ítems (mediana ≥ 4), el contenido fue considerado útil en 5 de 6 ítems (mediana ≥ 4) por todos los residentes y por 16 especialistas quienes tenían una experiencia de menos de 10 mastoidectomías anuales.	USD \$5.000 por cada estación de RV
Locketz y cols. 2017 ⁵³	Plataforma virtual de HT <i>CardinalSim</i>	Contenido.	16 residentes de ORL realizaron 12 sub tareas de mastoidectomía. Contestaron una encuesta de 10 puntos respecto a su confianza pre y posentrenamiento. El 87,5% reportó un aumento significativo de su confianza posentrenamiento ($P < 0,05$)	ND
O’Leary y cols. 2008 ³⁰	Simulador de HT <i>CSIRO/University of Melbourne</i>	Apariencia. Contenido.	12 residentes de cirugía general, sin experiencia en cirugías de ORL, entrenaron en el modelo durante una hora y luego realizaron una mastoidectomía radical en un modelo cadavérico. Un experto evaluó su desempeño con una escala de 0 a 3 puntos. 9 mostraron una técnica aceptable (1 punto) o buena (2 puntos) tras una sesión de entrenamiento. Los residentes consideraron el simulador como una representación convincente de fresado de HT.	ND
Zhao y cols. 2011 ³¹	Simulador de HT <i>CSIRO/University of Melbourne</i>	Apariencia. Contenido.	20 estudiantes de medicina, sin experiencia en disección de HT, tuvieron una clase de 1 hora, y fueron divididos en dos grupos. El primer grupo recibió entrenamiento tradicional con videos y tutoriales. El segundo grupo (RV) entrenó en el simulador. Luego realizaron una mastoidectomía cortical en HT cadavérico. 3 otólogos los evaluaron. El grupo RV obtuvo mejor puntaje global (67% versus 29%, $P < 0,001$), con mejor desempeño durante la cirugía (57% versus 43%, $P < 0,01$), mejor evaluación en el producto final (77% versus 53%, $P < 0,001$), y menos lesiones a estructuras (16% versus 30%, $P < 0,01$) que el primer grupo.	ND
Ioannou y cols. 2017 ³²	Simulador de HT <i>CSIRO/University of Melbourne</i>	Constructo.	7 otorrinolaringólogos y 7 residentes de ORL realizaron dos mastoidectomías con timpanotomía posterior y coeleostomía. El sistema virtual registró el procedimiento y calculó métricas de eficiencia, técnica, perforación y daño a estructuras vitales. Los especialistas tardaron significativamente menos tiempo ($P = 0,038$), fresaron de forma más eficiente, aplicaron más fuerza al remover la corteza ($P = 0,004$), fueron más cuidadosos al fresar cerca de estructuras vitales ($P = 0,016$) y produjeron menos daños ($P = 0,049$) que los residentes.	ND
Arora y cols. 2012 ³³	Simulador <i>VOXEL-MAN TempoSurg</i>	Apariencia. Contenido.	25 otorrinolaringólogos y 60 residentes de ORL realizaron una disección de HT en el modelo. Evaluaron el modelo con un cuestionario de 21 ítems con escala de Likert de 5 puntos. La apariencia del modelo fue evaluada por un 70% como aceptable (≥ 4 puntos), y su contenido obtuvo en promedio 4,3 puntos.	USD \$33.000
Khemani y cols. 2012 ³⁴	Simulador <i>VOXEL-MAN TempoSurg</i>	Constructo.	Se evaluó a 40 novatos quirúrgicos (grupo novato), 15 residentes de ORL (grupo intermedio) y 10 especialistas (grupo experto), quienes realizaron fresado de HT. Los grupos intermedio y experto completaron la tarea significativamente más rápido que el grupo novato ($P < 0,001$), lograron disecar más hueso ($P < 0,001$) y fueron más eficientes que el grupo novato ($P < 0,001$).	USD \$33.000

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Arora y cols. 2015 ³⁵	Simulador VOXEL-MAN <i>TempoSurg</i>	Contenido. Construido.	8 otorrinolaringólogos expertos y 8 residentes de ORL realizaron una mastoidectomía cortical en el modelo y se evaluó su desempeño. Los participantes evaluaron el modelo con una escala Likert de 5 puntos. El grupo experto tardó significativamente menos tiempo en completar la tarea que los residentes ($P < 0,001$), sin diferencias significativas en daño al seno sigmoideo ($P = 0,46$), duramadre ($P = 0,65$), nervio facial ($P = 0,42$) o a la cadena oscular ($P = 0,29$). Los participantes evaluaron la anatomía y la utilidad del modelo para entrenamiento de habilidades quirúrgicas con promedios de 4,1 y 4,4 puntos, respectivamente.	USD \$33.000
Zirkle y cols. 2007 ³⁶	Simulador VOXEL-MAN <i>TempoSurg</i>	Construido.	19 residentes de ORL realizaron una mastoidectomía cortical en el modelo de RV y en uno cadavérico. Fueron evaluados por dos otólogos. Los evaluadores fueron capaces de discriminar entre residentes novatos y experimentados en el modelo de RV al medir la economía de movimientos manuales ($P < 0,05$), la distancia recorrida ($P < 0,05$) y el tiempo total del procedimiento ($P < 0,05$). En el modelo cadavérico, los residentes con más experiencia tuvieron menor tiempo total que los novatos ($P < 0,05$), sin otras diferencias significativas.	USD \$33.000
Nash y cols. 2012 ³⁷	Simulador VOXEL-MAN <i>TempoSurg</i>	Construido.	4 estudiantes de medicina realizaron una mastoidectomía cortical, exposición del seno sigmoideo y apófisis corta del martillo, seis veces en el modelo. Se evaluó su desempeño. El puntaje total y el volumen de hueso removido no varió entre sesiones de práctica, pero el tiempo operatorio disminuyó al repetir la exposición del seno sigmoideo y apófisis corta del martillo ($P = 0,01$ y $P < 0,001$, respectivamente). Los errores disminuyeron en cada tarea tras las repeticiones ($P = 0,05$).	USD \$33.000
Zhao y cols. 2011 ³⁹	Modelo The Mediseus® Surgical Drilling Simulator	Construido.	8 residentes de ORL y 12 novatos recibieron 2 horas de clase lectiva, respondieron una prueba de alternativas y fueron divididos en dos grupos. El grupo tradicional recibió clases con videos y análisis de TC. El grupo RV practicó 2 horas en el modelo. Luego, realizaron una mastoidectomía radical canal wall down en un modelo cadavérico. Fueron evaluados por dos otólogos usando una escala de Welling modificada. El grupo RV fue significativamente mejor evaluado que el grupo tradicional en el producto final ($P < 0,001$), causaron menor daño a estructuras ($P = 0,01$), y tuvieron un mejor desempeño general ($P = 0,04$).	ND
Zhao y cols. 2010 ³⁸	Modelo The Mediseus® Surgical Drilling Simulator	Construido.	12 otorrinolaringólogos (expertos), 6 residentes de ORL (intermedio) y 9 novatos recibieron material de lectura y luego realizaron una mastoidectomía radical modificada en el modelo virtual. Se comparó los tiempos y daños estructurales entre grupos. Los expertos completaron la tarea en tiempos significativamente menores que los otros dos grupos ($P = 0,001$). Los novatos provocaron más daños estructurales que los expertos ($P = 0,001$).	ND
Meyer y cols. 2020 ⁴⁰	Modelo Stryker Surgical Simulator, que usa retroalimentación táctil y táctil	Apariencia. Contenido. Construido.	6 otorrinolaringólogos y 9 residentes de ORL realizaron 5 mastoidectomías corticales. Se evaluó su desempeño usando una adaptación de la escala de Welling. Además, completaron un cuestionario pre y posprocedimiento evaluando la apariencia y contenido. Ambos grupos evaluaron favorablemente la apariencia y contenido del modelo. El tiempo de fresado de los residentes fue significativamente mayor que el de los especialistas ($P = 0,008$). No hubo diferencias significativas entre el desempeño de ambos grupos ($P = 0,52$).	ND

Modelos RV basados en TC de HT			
Wiet y cols. 2002 ⁴¹	Modelo RV basado en TC de HT cadavérico	Apariencia.	43 otólogos evaluaron el modelo. Los otólogos expertos de mayor edad evaluaron con menor puntaje al modelo virtual en comparación a aquellos que se encuentran más familiarizados con el uso de computadores. No se describen resultados cuantitativos.
Andersen y cols. 2021 ⁴²	Modelo RV basado en TC de HT de 22 adultos vivos sometidos a implante coclear	Apariencia.	4 otólogos y 5 residentes de ORL realizaron en promedio 16,5 mastoidectomías en el simulador cada uno. La experiencia general de simulación y la utilidad del modelo para planificación quirúrgica fueron calificadas como “bueno”, “muy bueno o excelente” en un 84,6% y 71,6% de las intervenciones, respectivamente. En un 10,7% de ellas los participantes indicaron haber adquirido mayor comprensión de la anatomía en comparación al uso de imágenes. Un 60,4% pudo identificar con mayor facilidad hallazgos anatómicos sutiles.
Wiet y cols. 2012 ⁴⁴	Modelo RV basado en TC de HT y datos histológicos ⁴³	Contenido.	66 residentes de ORL de distintas universidades fueron randomizados en dos grupos; uno usando el simulador virtual y otro el modelo cadavérico. Realizaron una disección de HT cadavérico y en RV pre y posentrenamiento. Dos otólogos evaluaron su desempeño con una escala de Welling modificada. Se encontraron diferencias significativas en los puntajes obtenidos según la institución de procedencia (P = 0.013). La diferencia del puntaje pre y posttest fue levemente mayor en el grupo cadavérico que en el de RV (P = 0,0594).
Comparación de modelo RV con modelo de otro tipo			
Wong y cols. 2014 ⁴³	Comparación de modelo RV basado en TC de modelo cadavérico, con modelo cadavérico	Apariencia. Contenido.	10 residentes de ORL realizaron fresado de HT en un modelo cadavérico y luego en el modelo RV. Evaluaron su similitud con una escala de Likert de 7 puntos. Consideraron al modelo de RV como una herramienta educacional efectiva (5,4±1,5) y precisa (5,7±1,4), el cual debería ser integrado al programa de formación (5,5±1,8) y mejora el desempeño (5,3±1,8) y confianza (5,3±1,9) en el procedimiento quirúrgico. El modelo obtuvo alta calificación para el aprendizaje anatómico (6,1±1,9). Se consideró una menor similitud en comparación al modelo cadavérico en sus propiedades físicas respecto a perforación ósea cortical (3,2±2,0) y trabecular (2,8±1,6).
Hochman y cols. 2015 ⁴⁶	Comparación de modelo RV con modelo de impresión 3D	Apariencia. Contenido.	10 residentes de ORL realizaron fresado de HT en ambos modelos. Los evaluaron con una encuesta de Likert de 7 puntos. El modelo de impresión 3D fue considerado más similar al HT cadavérico que el de RV en su calidad de fresado (P=0,004) y representación de las celdillas mastoideas (P = 0,003). Los participantes estuvieron muy de acuerdo en que ambos modelos son herramientas educacionales efectivas, pero evaluaron significativamente mejor al de impresión 3D, 6,7 versus 5,4 puntos (P = 0,019). Estuvieron de acuerdo en que ambos modelos deberían ser integrados en su formación, pero estuvieron con mayor inclinación hacia el modelo 3D (P = 0,002).
Entrenamiento en modelos RV			
Andersen y cols. 2016 ⁴⁵	Efecto del entrenamiento en modelo RV	Contenido.	40 residentes de ORL fueron divididos en dos grupos. El primero realizó una mastoidectomía en un modelo virtual y luego en uno cadavérico, el segundo grupo entrenó siguiendo el orden contrario. Tres expertos evaluaron el producto final usando una escala de Welling modificada de 25 ítems, con puntuación 0 o 1 en cada uno. El primer grupo obtuvo una calificación significativamente mayor que el segundo grupo, 14,9 versus 9,8 puntos (P < 0,0001).
			< USD \$5,000

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Andersen y cols. 2018 ⁴⁹	Efecto del entrenamiento en modelo RV	Contenido:	9 residentes de ORL entrenaron fresa de HT en un modelo de RV previo al curso formal de HT del currículum formativo. 28 residentes no recibieron dicho entrenamiento. Se evaluó el producto final de disección cadavérica de cada grupo con una escala de Welling modificada de 26 de 0 a 1 punto. El grupo expuesto al entrenamiento previo obtuvo resultados significativamente mejores que el grupo control, 12,8 versus 10,3 puntos ($P < 0,01$).	ND
Andersen y cols. 2016 ⁵⁰	Retención de habilidades con el uso de modelo RV	Contenido:	36 estudiantes de medicina fueron divididos en dos grupos para entrenamiento de mastoidectomía cortical. Un grupo fue expuesto a práctica deliberada en un modelo de RV y el otro grupo recibió el mismo entrenamiento durante solo un día (12 sesiones). 3 meses después de completar el entrenamiento realizaron dos mastoidectomías corticales en el modelo virtual, que fueron evaluadas por 2 otólogos con una escala de Welling modificada. El segundo grupo obtuvo mejor desempeño al final del entrenamiento ($P = 0,005$), pero a los 3 meses posentrenamiento no tuvo diferencias significativas con el primer grupo ($P = 0,89$). Para ambos grupos, la diferencia del desempeño al final del entrenamiento y a los 3 meses no fue significativa ($P = 0,1$ y $P = 0,2$, respectivamente).	ND
Andersen y cols. 2015 ⁵²	Curva de aprendizaje con el uso de modelo RV	Contenido:	40 estudiantes de medicina fueron divididos en dos grupos. Un grupo fue expuesto a práctica deliberada en un modelo de RV y el otro grupo recibió el mismo entrenamiento durante solo un día (12 sesiones). En cada sesión realizaron mastoidectomía cortical, que fueron evaluadas por 2 expertos con una escala de Welling modificada con 26 ítems de 0 a 1 punto. Las curvas de aprendizaje se establecieron y fueron superiores en el primer grupo ($P = 0,002$). Se vio que llegaron a un <i>plateau</i> en la novena sesión con un promedio de 16 puntos (rango 15,3-16,7).	ND
Andersen y cols. 2017 ⁵¹	Curva de aprendizaje con el uso de modelo RV	Contenido:	40 estudiantes de medicina fueron divididos en dos grupos. Un grupo fue expuesto a práctica deliberada en un modelo de RV y el otro grupo recibió el mismo entrenamiento durante solo un día (12 sesiones). En cada sesión realizaron mastoidectomía cortical, que fueron evaluadas por 2 expertos con una escala de Welling modificada con 26 ítems de 0 a 1 punto. En la curva de aprendizaje se encontraron dificultades (promedio $<0,25$ puntos) en evitar perforar agujeros en los límites anatómicos externos de la mastoidectomía y frecuentemente lesionaron estructuras esenciales, tales como, los huesecillos, canal semicircular lateral, y el nervio facial. Se observó una dependencia importante en la función de tutor integrado del simulador, así como falta de auto-evaluación de su desempeño	ND
Otros				
Kenwin y cols. 2009 ⁴⁷	Modelo RV con optimización de realismo de superficies húmedas, con un programa de fluidos basados en cuadrículas del código Mark Harris, adaptado al modelo RV.	Apariencia: Contenido:	3 expertos evaluaron las características del modelo con una escala de Likert de 5 puntos. La característica mejor evaluada fue la iluminación del modelo (5,0 puntos). Las sombras y sangre del modelo fueron aceptables (4,0 puntos). Consideraron útiles las actualizaciones al software para el entrenamiento de fresa de HT y la exploración de abordajes quirúrgicos preoperatorios.	ND
Frendo y cols. 2019 ⁴⁸	Modelo RV con <i>freeware</i> de alta fidelidad para descentralización de entrenamiento de mastoidectomía	Apariencia:	20 residentes de ORL obtuvieron acceso a un simulador virtual de mastoidectomía durante tres meses. Evaluaron su utilidad mediante cuestionarios y entrevistas en grupos focales. En promedio, los participantes entrenaron en total 3,5 hrs cada uno (rango 0-15 hrs), principalmente hacia el final del plazo establecido. Identificaron como ventajas su conveniencia y facilidad de uso, pero una de las principales limitantes fue el tiempo pues no se les designó un espacio protegido para realizar la actividad.	ND

TC: tomografía computada; HT: hueso temporal; ORL: otorrinolaringología; ND: no descrito.

Frecuentemente, no son bien preservados por lo que el proceso de degeneración limita su uso¹⁰. También existen programas de donación voluntaria de cuerpos a la ciencia, pero suelen ser escasos.

En este contexto, los modelos de simulación no cadavéricos han adquirido relevancia. Estos permiten practicar procedimientos y adquirir habilidades a través de condiciones estandarizadas y reproducibles³⁵. Los avances tecnológicos han permitido generar una experiencia realista mediante dispositivos táctiles, y retroalimentación visual y auditiva^{41,47}. Asimismo, los residentes en práctica pueden recibir retroalimentación por parte de expertos de forma presencial o remota, mediante la función de grabación integrada en algunos modelos de simulación³⁹. Todas estas características pueden contribuir a disminuir la inequidad de exposición a cirugías otorrinolaringológicas a nivel mundial, mejorar la confianza y la habilidad técnica de los residentes en práctica y progresar en su curva de aprendizaje, sin los riesgos asociados para los pacientes^{27,58}.

Si bien se encontraron varios modelos de simulación para fresado de HT, solo algunos de los de RV^{32,34-40} y ninguno de los de impresión 3D, cuentan con validez de constructo. Esto es relevante a la hora de considerar incorporar alguna de estas herramientas de formación a los currículos oficiales, pues al encontrarse validadas brindan mayor seguridad respecto a su potencial educativo. Por lo anterior, es primordial evaluar la validez de constructo de los modelos de simulación. Cabe destacar que no se ha evaluado la validez predictiva de ninguno de los modelos encontrados, es decir, ninguno ha sido estudiado evaluando la capacidad de transferencia de habilidades del ambiente simulado a la situación real con el paciente en cirugía.

En cuanto a las ventajas y desventajas entre los modelos, aquellos con mayor fidelidad anatómica resultaron ser los de origen cadavérico e impresión 3D. Sin embargo, estos fueron los con mayor costo asociado, y en el caso del cadavérico, uno de los modelos con acceso más limitado. Se estima que el costo de desarrollar un laboratorio cadavérico de HT podría alcanzar el millón de dólares, sin contar su mantención⁵⁷. Las impresoras 3D también son costosas, más aún si se trata de

impresoras especializadas. Sin embargo, en el mercado existen impresoras de menor costo que oscilan entre los USD \$1.500 y \$7.000²⁰, y el costo material de cada modelo de resina estándar es de aproximadamente USD \$10⁸. Los modelos de RV varían en sus costos. Pocos de los simuladores encontrados en esta revisión especificaron su precio, oscilando entre los USD \$5.000 y \$33.000. Buscando contribuir en el entrenamiento basado en simulación de países con recursos limitados, un grupo instaló en Nicaragua una versión reducida del simulador virtual de HT pediátrico del *Ohio State University and Nationwide Children's Hospital*. Este consta de cuarenta modelos de HT y su costo total fue de USD \$5.000⁵⁷.

Una de las ventajas de los modelos de RV, en comparación a los cadavéricos o de impresión 3D, es la personalización de su diseño y su modalidad reutilizable al permitir realizar, nuevamente, el procedimiento sin necesidad de volver a construir el modelo. No obstante, dentro de sus desventajas se encuentran que su ergonomía y retroalimentación táctil son subóptimos²⁹, y que tienen una menor fidelidad anatómica y física por posibles defectos de diseño inherentes⁴⁰. En esta línea, Hochman y cols. diseñaron un modelo híbrido de RV e impresión 3D para optimizar el aspecto táctil²⁶. Por otra parte, si bien los modelos de bajo costo se presentan como una oportunidad de fácil acceso, éstos cuentan con mínima fidelidad anatómica y de apariencia.

Por último, en la literatura se han descrito reconstrucciones digitales en 3D de HT⁵⁹, que podrían utilizarse como plantillas para una futura impresión 3D o ser incluidos dentro de un programa de RV. Por ejemplo, *The OpenEar library* es una base de datos de plantillas de modelos 3D de HT cargados en el repositorio de datos de investigación de acceso abierto "Zenodo", y se encuentran disponibles para descargar de forma gratuita⁶⁰.

A lo largo de los años se ha realizado fresado de HT cadavérico en la formación de los residentes de nuestro centro. Inicialmente se utilizaban huesos secos, sin embargo, desde el 2018 se modificó a fresado con muestras con preservación de tejidos, lo que permite mayor similitud a una cirugía real. Actualmente, se realizan cinco sesiones de fresado de HT anualmente, lo que permite a los residentes egresar

ARTÍCULO DE REVISIÓN

con el aprendizaje de dos sesiones durante los 3 años de formación académica en ORL. Los resultados de este taller están siendo evaluados y serán publicados en un próximo artículo.

Conclusión

La literatura actual cuenta con numerosos estudios que presentan modelos de simulación quirúrgica de fresado de HT, predominando los de impresión 3D y RV. Estos son una alternativa al fresado de HT cadavérico y presentan distintos costos, materiales, y complejidad tecnológica. Los simuladores de impresión 3D tienen mayor fidelidad anatómica y táctil que los de RV, pero tienen un mayor costo y no son reutilizables. La mayoría de los simuladores cuenta con validez de apariencia, varios con validez de contenido, pocos con validez de constructo, y ninguno con validez predictiva. Se requieren mayores estudios para determinar tanto la validez de constructo y la transferencia de habilidades a la práctica quirúrgica con pacientes, planteando un desafío a seguir.

Bibliografía

1. Lui JT, Hoy MY. Evaluating the Effect of Virtual Reality Temporal Bone Simulation on Mastoidectomy Performance: A Meta-analysis. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017;156(6):1018-1024. doi:10.1177/0194599817698440.
2. Kashikar TS, Kerwin TF, Moberly AC, Wiet GJ. A review of simulation applications in temporal bone surgery. *Laryngoscope Investig Otolaryngol.* 2019;4(4):420-424. doi:10.1002/lio.2.277.
3. Francis HW, Masood H, Laeeq K, Bhatti NI. Defining milestones toward competency in mastoidectomy using a skills assessment paradigm. *Laryngoscope.* 2010;120(7):1417-1421. doi:10.1002/lary.20953.
4. Tejos R, Avila R, Inzunza M, et al. Impact of a Simulated LaparoscopicC Training Program in a three-year General Surgery Residency. *Arq Bras Cir Dig.* 2019;32(2):e1436. doi:10.1590/0102-672020190001e1436.
5. Gauna F, Goldman Y, Torrente M. Evaluación de competencias quirúrgicas de los egresados del Programa de Formación en Otorrinolaringología de la Universidad de Chile. *Rev Otorrinolaringol Cir Cabeza Cuello.* 2018;78(2):133-140. doi:10.4067/s0717-75262018000200133.
6. Vela J, Contreras C, Jarry C, Varas J, Corvetto M. Recomendaciones generales para elaborar un programa de entrenamiento basado en simulación para desarrollar competencias en pregrado y postgrado. *Simulación Clínica.* 2020;2(1):26-38. doi:10.35366/92936.
7. Naik SM, Naik MS, Bains NK. Cadaveric temporal bone dissection: is it obsolete today? *Int Arch Otorhinolaryngol.* 2014;18(1):63-67. doi:10.1055/s-0033-1351681.
8. Mowry SE, Jabbour N, Rose AS, et al. Multi-institutional Comparison of Temporal Bone Models: A Collaboration of the AAO-HNSF 3D-Printed Temporal Bone Working Group. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2021;164(5):1077-1084. doi:10.1177/0194599820960474.
9. Unger BJ, Kraut J, Rhodes C, Hochman J. Design and Validation of 3D Printed Complex Bone Models with Internal Anatomic Fidelity for Surgical Training and Rehearsal. *Stud Health Technol Inform.* 2014;196:439-445. doi:10.3233/978-1-61499-375-9-439.
10. Okada DM, de Sousa AMA, Huertas R de A, Suzuki FA. Surgical simulator for temporal bone dissection training. *Braz J Otorhinolaryngol.* 2010;76(5):575-578. doi:10.1590/S1808-86942010000500007.
11. Frithioff A, Frendø M, Pedersen DB, Sørensen MS, Wuyts Andersen SA. 3D-Printed Models for Temporal Bone Surgical Training: A Systematic Review. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2021;165(5):617-625. doi:10.1177/0194599821993384.
12. Gadaleta DJ, Huang D, Rankin N, et al. 3D printed temporal bone as a tool for otologic surgery simulation. *Am J Otolaryngol.* 2020;41(3):102273. doi:10.1016/j.amjoto.2019.08.004.
13. Hochman JB, Rhodes C, Wong D, Kraut J, Pisa J, Unger B. Comparison of cadaveric and isomorphic three-dimensional printed models in temporal bone education. *Laryngoscope.* 2015;125(10):2353-2357. doi:10.1002/lary.24919.
14. Aussedat C, Venail F, Nguyen Y, Lescanne E, Marx M, Bakhos D. Usefulness of temporal bone prototype for drilling training: A prospective study. *Clin Otolaryngol.* 2017;42(6):1200-1205. doi:10.1111/coa.12846.
15. Bento RF, Rocha BA, Freitas EL, Balsalobre F de A. Otobone®: Three-dimensional printed Temporal Bone Biomodel for Simulation of Surgical Procedures. *Int Arch Otorhinolaryngol.* 2019;23(4):e451-e454. doi:10.1055/s-0039-1688924.
16. Chenebaux M, Lescanne E, Robier A, Kim S, Bakhos D. Evaluation of a temporal bone prototype by experts in otology. *J Laryngol Otol.* 2014;128(7):586-590. doi:10.1017/S0022215114001297.
17. Chien WW, da Cruz MJ, Francis HW. Validation of a 3D-printed human temporal bone model for otology surgical skill training. *World J Otorhinolaryngol*

- Head Neck Surg.* 2021;7(2):88-93. doi:10.1016/j.wjorl.2020.12.004.
18. Rose AS, Kimbell JS, Webster CE, Harrysson OLA, Formeister EJ, Buchman CA. Multi-material 3D Models for Temporal Bone Surgical Simulation. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2015;124(7):528-536. doi:10.1177/0003489415570937.
 19. Rose AS, Webster CE, Harrysson OLA, Formeister EJ, Rawal RB, Iseli CE. Pre-operative simulation of pediatric mastoid surgery with 3D-printed temporal bone models. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.* 2015;79(5):740-744. doi:10.1016/j.ijporl.2015.03.004.
 20. Mowry SE, Jammal H, Myer C 4th, Solares CA, Weinberger P. A Novel Temporal Bone Simulation Model Using 3D Printing Techniques. *Otol Neurotol.* 2015;36(9):1562-1565. doi:10.1097/MAO.0000000000000848.
 21. Takahashi K, Morita Y, Ohshima S, et al. Creating an Optimal 3D Printed Model for Temporal Bone Dissection Training. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2017;126(7):530-536. doi:10.1177/0003489417705395.
 22. McMillan A, Kocharyan A, Dekker SE, et al. Comparison of Materials Used for 3D-Printing Temporal Bone Models to Simulate Surgical Dissection. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2020;129(12):1168-1173. doi:10.1177/0003489420918273.
 23. Fang TY, Wang PC, Liu CH, Su MC, Yeh SC. Evaluation of a haptics-based virtual reality temporal bone simulator for anatomy and surgery training. *Comput Methods Programs Biomed.* 2014;113(2):674-681. doi:10.1016/j.cmpb.2013.11.005.
 24. Kockro RA, Hwang PYK. Virtual temporal bone: an interactive 3-dimensional learning aid for cranial base surgery. *Neurosurgery.* 2009;64(5 Suppl 2):216-229; discussion 229-230. doi:10.1227/01.NEU.0000343744.46080.91.
 25. Barber SR, Jain S, Mooney MA, et al. Combining Stereoscopic Video and Virtual Reality Simulation to Maximize Education in Lateral Skull Base Surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2020;162(6):922-925. doi:10.1177/0194599820907866.
 26. Hochman JB, Sepehri N, Rampersad V, et al. Mixed reality temporal bone surgical dissector: mechanical design. *J Otolaryngol Head Neck Surg.* 2014;43:23. doi:10.1186/s40463-014-0023-9.
 27. Pimomchai P, Avery A, Laopaiboon M, Kennedy G, O'Leary S. Virtual reality training for improving the skills needed for performing surgery of the ear, nose or throat. *Cochrane Database Syst Rev.* 2015;(9):CD010198. doi:10.1002/14651858.CD010198.pub2.
 28. Bhutta MF. A review of simulation platforms in surgery of the temporal bone. *Clin Otolaryngol.* 2016;41(5):539-545. doi:10.1111/coa.12560.
 29. Compton EC, Agrawal SK, Ladak HM, et al. Assessment of a virtual reality temporal bone surgical simulator: a national face and content validity study. *J Otolaryngol Head Neck Surg.* 2020;49(1):17. doi:10.1186/s40463-020-00411-y.
 30. O'Leary SJ, Hutchins MA, Stevenson DR, et al. Validation of a networked virtual reality simulation of temporal bone surgery. *Laryngoscope.* 2008;118(6):1040-1046. doi:10.1097/MLG.0b013e3181671b15.
 31. Zhao YC, Kennedy G, Yukawa K, Pyman B, O'Leary S. Improving temporal bone dissection using self-directed virtual reality simulation: results of a randomized blinded control trial. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2011;144(3):357-364. doi:10.1177/0194599810391624.
 32. Ioannou I, Zhou Y, Wijewickrema S, et al. Comparison of Experts and Residents Performing a Complex Procedure in a Temporal Bone Surgery Simulator. *Otol Neurotol.* 2017;38(6):e85-e91. doi:10.1097/MAO.0000000000001398.
 33. Arora A, Khemani S, Tolley N, et al. Face and content validation of a virtual reality temporal bone simulator. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2012;146(3):497-503. doi:10.1177/0194599811427385.
 34. Khemani S, Arora A, Singh A, Tolley N, Darzi A. Objective skills assessment and construct validation of a virtual reality temporal bone simulator. *Otol Neurotol.* 2012;33(7):1225-1231. doi:10.1097/MAO.0b013e31825e7977.
 35. Arora A, Hall A, Kotecha J, et al. Virtual reality simulation training in temporal bone surgery. *Clin Otolaryngol.* 2015;40(2):153-159. doi:10.1111/coa.12352.
 36. Zirkle M, Roberson DW, Leuwer R, Dubrowski A. Using a virtual reality temporal bone simulator to assess otolaryngology trainees. *Laryngoscope.* 2007;117(2):258-263. doi:10.1097/01.mlg.0000248246.09498.b4.
 37. Nash R, Sykes R, Majithia A, Arora A, Singh A, Khemani S. Objective assessment of learning curves for the Voxel-Man TempoSurg temporal bone surgery computer simulator. *J Laryngol Otol.* 2012;126(7):663-669. doi:10.1017/S0022215112000734.
 38. Zhao YC, Kennedy G, Hall R, O'Leary S. Differentiating levels of surgical experience on a virtual reality temporal bone simulator. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2010;143(5 Suppl 3):S30-S35. doi:10.1016/j.otohns.2010.03.008.
 39. Zhao YC, Kennedy G, Yukawa K, Pyman B, O'Leary S. Can virtual reality simulator be used as a training aid to improve cadaver temporal bone dissection? Results of a randomized blinded control trial. *Laryngoscope.* 2011;121(4):831-837. doi:10.1002/lary.21287.
 40. Meyer C, Noda F, Folsom CR. Hybrid Surgical Simulator: A Temporal Bone Simulator Validation Study of the Stryker Surgical Simulator (S3). *Mil Med.*

ARTÍCULO DE REVISIÓN

- 2020;185(11-12):e2026-e2031. doi:10.1093/milmed/usaal178.
41. Wiet GJ, Stredney D, Sessanna D, Bryan JA, Welling DB, Schmalbrock P. Virtual temporal bone dissection: an interactive surgical simulator. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2002;127(1):79-83. doi:10.1067/mhn.2002.126588.
 42. Andersen SAW, Varadarajan VV, Moberly AC, Hittle B, Powell KA, Wiet GJ. Patient-specific Virtual Temporal Bone Simulation Based on Clinical Cone-beam Computed Tomography. *Laryngoscope.* 2021;131(8):1855-1862. doi:10.1002/lary.29542.
 43. Wong D, Unger B, Kraut J, Pisa J, Rhodes C, Hochman JB. Comparison of cadaveric and isomorphic virtual haptic simulation in temporal bone training. *J Otolaryngol Head Neck Surg.* 2014;43:31. doi:10.1186/s40463-014-0031-9.
 44. Wiet GJ, Stredney D, Kerwin T, et al. Virtual temporal bone dissection system: OSU virtual temporal bone system: development and testing. *Laryngoscope.* 2012;122 Suppl 1:S1-S12. doi:10.1002/lary.22499.
 45. Andersen SAW, Foghsgaard S, Konge L, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. The effect of self-directed virtual reality simulation on dissection training performance in mastoidectomy. *Laryngoscope.* 2016;126(8):1883-1888. doi:10.1002/lary.25710.
 46. Hochman JB, Rhodes C, Kraut J, Pisa J, Unger B. End User Comparison of Anatomically Matched 3-Dimensional Printed and Virtual Haptic Temporal Bone Simulation: A Pilot Study. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2015;153(2):263-268. doi:10.1177/0194599815586756.
 47. Kerwin T, Shen HW, Stredney D. Enhancing realism of wet surfaces in temporal bone surgical simulation. *IEEE Trans Vis Comput Graph.* 2009;15(5):747-758. doi:10.1109/TVCG.2009.31.
 48. Frendø M, Thinggaard E, Konge L, Sørensen MS, Andersen SAW. Decentralized virtual reality mastoidectomy simulation training: a prospective, mixed-methods study. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2019;276(10):2783-2789. doi:10.1007/s00405-019-05572-9.
 49. Andersen SAW, Foghsgaard S, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. The Effect of a Distributed Virtual Reality Simulation Training Program on Dissection Mastoidectomy Performance. *Otol Neurotol.* 2018;39(10):1277-1284. doi:10.1097/MAO.0000000000002031.
 50. Andersen SAW, Konge L, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. Retention of Mastoidectomy Skills After Virtual Reality Simulation Training. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg.* 2016;142(7):635-640. doi:10.1001/jamaoto.2016.0454.
 51. Andersen SAW, Konge L, Mikkelsen PT, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. Mapping the plateau of novices in virtual reality simulation training of mastoidectomy. *Laryngoscope.* 2017;127(4):907-914. doi:10.1002/lary.26000.
 52. Andersen SAW, Konge L, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. Learning Curves of Virtual Mastoidectomy in Distributed and Massed Practice. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg.* 2015;141(10):913-918. doi:10.1001/jamaoto.2015.1563.
 53. Locketz GD, Lui JT, Chan S, et al. Anatomy-Specific Virtual Reality Simulation in Temporal Bone Dissection: Perceived Utility and Impact on Surgeon Confidence. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017;156(6):1142-1149. doi:10.1177/0194599817691474.
 54. Meléndez García JM, Araujo Da Costa AS, Rivera Schmitz T, Chiesa Estomba CM, Hamdan Zavarce MI. Temporal bone dissection practice using a chicken egg. *Otol Neurotol.* 2014;35(6):941-943. doi:10.1097/MAO.0000000000000390.
 55. Kunac A, Oliver JB, McFarlane JL, Anjaria DJ. General Surgical Resident Operative Autonomy vs Patient Outcomes: Are we Compromising Training without Net Benefit to Hospitals or Patients? *J Surg Educ.* 2021;78(6):e174-e182. doi:10.1016/j.jsurg.2021.09.017.
 56. Álvarez ML, Waissbluth S, González C, et al. How the COVID-19 pandemic affects specialty training: An analysis of a nationwide survey among otolaryngology residents in Chile. *Medwave.* 2021;21(1):e8098. doi:10.5867/medwave.2021.01.8097.
 57. Wiet GJ, Stredney D, Kerwin T, Hittle B, Kang DR. Simulation for training in resource-restricted countries: using a scalable temporal bone surgical simulator. *J Int Assoc Med Sci Educ.* 2016;7:293-294. doi:10.5116/ijme.57c1.4c8a.
 58. Hochman JB, Kraut J, Kazmerik K, Unger BJ. Generation of a 3D printed temporal bone model with internal fidelity and validation of the mechanical construct. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2014;150(3):448-454. doi:10.1177/0194599813518008.
 59. Ahmad N, Wright A. Three-dimensional temporal bone reconstruction from histological sections. *J Laryngol Otol.* 2014;128(5):416-420. doi:10.1017/S0022215114000917.
 60. Sieber D, Erfurt P, John S, et al. The OpenEar library of 3D models of the human temporal bone based on computed tomography and micro-slicing. *Sci Data.* 2019;6:180297. doi:10.1038/sdata.2018.297.