

Biomateriales y tecnologías de impresión 3D en entrenamiento quirúrgico en otorrinolaringología: una revisión

Biomaterials and technologies of 3D printing in surgical training on otorhinolaryngology: a revision

Nicolás Meszaros E.¹, Ignacio Cortés F.¹, Úrsula Zelada B.^{1,2}, Felipe Cardemil M.^{2,3}

¹Servicio de Otorrinolaringología, Hospital Barros Luco Trudeau. Facultad de Medicina, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

²Departamento de Otorrinolaringología, Facultad de Medicina, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

³Departamento de Otorrinolaringología, Clínica las Condes. Santiago, Chile.

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Recibido el 11 de abril de 2022. Aceptado el 1 de junio de 2022.

Correspondencia:
Dra. Úrsula Zelada B
Servicio de Otorrinolaringología, Hospital Barros Luco Trudeau. Facultad de Medicina, Universidad de Chile.
Santiago, Chile.
Email: ursulazb@gmail.com

Resumen

La tecnología de fabricación aditiva o impresión 3D se ha posicionado como una herramienta transversal y de uso creciente en el mundo productivo y científico que ha otorgado la posibilidad de diseñar y crear elementos y modelos de diversa complejidad. En el área biomédica ha presentado un aumento significativo de sus aplicaciones a través del tiempo, actualmente teniendo relevancia en ámbitos como el planeamiento quirúrgico, la creación de prótesis, modelos anatómicos para educación y entrenamiento quirúrgico. Actualmente existen diversas dificultades que limitan la formación quirúrgica, especialmente en ciertas áreas de la otorrinolaringología como la cirugía de oído. El objetivo de la presente revisión narrativa fue actualizar los usos de la tecnología de impresión 3D para la creación de modelos para entrenamiento quirúrgico en otorrinolaringología, destacando sus potenciales usos en otología, rinología, cirugía de base de cráneo y vía aérea.

Palabras clave: impresión tridimensional, otorrinolaringología, entrenamiento de simulación, hueso temporal, modelos.

Abstract

Additive manufacturing technology or 3D printing has positioned itself as a cross-cutting tool of increasing use in the productive and scientific world that has given the possibility of designing and creating different elements and models of varying complexity. In the biomedical area, it has presented a significant increase in its applications over time, currently having relevance in areas such as surgical planning, the creation of prostheses, anatomical models for education and surgical training. Currently there are various difficulties that limit surgical training, especially in certain areas of otorhinolaryngology such as ear surgery. The objective of this narrative review was to update the uses of 3D printing technology for the creation of models for surgical training in otorhinolaryngology, highlighting its potential uses in otology, rhinology, skull base and airway surgery.

Keywords: printing, three-dimensional, otorhinolaryngology, simulation training, temporal bone, models.

Introducción

La adquisición de habilidades y competencias quirúrgicas de residentes corresponde a uno de los elementos esenciales en la formación del otorrinolaringólogo. No obstante, el acceso a instancias de aprendizaje práctico en pacientes ha cambiado a lo largo del tiempo

¹. Los factores involucrados en el menor acceso a instancias prácticas incluyen, entre otros: dificultades para ejercer como primer cirujano en pabellón debido a disposiciones médico-legales, presión asistencial, expectativas de los pacientes, menor acceso a material cadavérico y menor disponibilidad de pabellón, entre otros².

Los modelos de simulación biomédicos han surgido como una alternativa a la práctica en material cadavérico y el ejercicio en pacientes, lo cual, si bien no reemplaza la práctica real con estos últimos, se constituye como una alternativa válida para complementar la adquisición de ciertas destrezas necesarias para el ejercicio como especialista³.

De esta manera, la tecnología de impresión de modelos tridimensionales (3D) se ha presentado como una alternativa para la producción de modelos anatómicos de estructuras complejas⁴. La impresión 3D representa un término generalizado que abarca múltiples técnicas que permiten crear un objeto a partir del diseño de software o datos radiográficos^{5,6}, lo cual ha permitido utilizar modelos 3D con el fin de realizar entrenamiento quirúrgico⁷, mostrando versatilidad debido al uso de distintos materiales de diversas características físicas.

Así, el objetivo de esta revisión es otorgar una visión general acerca del uso de biomateriales y tecnologías de impresión 3D en entrenamiento quirúrgico en otorrinolaringología.

Aspectos técnicos de la impresión 3D

La impresión 3D o fabricación aditiva consiste en la construcción de modelos mediante un proceso de adición de material capa por capa, permitiendo la creación de estructuras complejas las cuales no podrían ser fabricadas por métodos clásicos de sustracción desde una pieza de materia prima y para lo cual actualmente se encuentran disponibles un abanico de opciones técnicas de fabricación y materiales, con diferentes características en sus propiedades mecánicas, acceso, tiempos y costos. Una clasificación de los distintos métodos de impresión fue creada por la "ASTM International Committee F42 on 3DP technologies" separándolos en 7 procesos⁸, dentro de los cuales podemos mencionar las siguientes tecnologías:

La Estereolitografía (SLA), que fue la técnica inicial de fabricación aditiva y sigue vigente hasta la actualidad. Funciona mediante la fotopolimerización de una resina líquida sobre la cual se incide una fuente de luz UV que sigue

la forma deseada, volviéndola sólida. Requiere usualmente la remoción de resina sobrante y un curado posterior.

La inyección de material (MJ) es similar a la SLA, en la cual se deposita un fotopolímero sobre la bandeja de trabajo mediante inyectores con un curado selectivo mediante luz UV posterior. Lo anterior permite estructuras de excelente resolución, terminado liso, múltiples colores y materiales heterogéneos. Para estructuras más complejas, puede contar con un material gel que presta soporte y puede ser retirado posteriormente a mano o con agua.

La técnica de inyección de aglutinante o *Binder Jetting* es aquella donde se utiliza una resina la cual es depositada sobre el polímero pulverizado que se encuentra en una plataforma, uniéndola y formando la estructura deseada, pudiendo ser posteriormente infiltrado con productos como el cianocrilato para entregar mayor dureza. No requiere estructura de soporte, pero sí un aspirado del polímero pulverizado al terminar.

El modelado por deposición fundida (FDM), que es una de las técnicas más difundidas, accesibles y económicas, con una gama variada de materiales, impresiones multicolor, pero limitada por una peor resolución y acabado. Funciona mediante el uso de un filamento del material a utilizar, el cual es extruido a través de una boquilla caliente, depositándose en capas que posteriormente se solidifican al enfriarse.

Proceso de modelado e impresión en 3D

Para describir el proceso de generación de modelos 3D a partir de imágenes, debemos primero mencionar dos conceptos básicos de los procesos de manufactura moderna, el CAD (*computer assisted design*) y el CAM (*computer assisted manufacture*). El primero es el proceso de diseño mediante software para ayudar en el desarrollo y problemas analíticos. CAM es el uso de sistemas informáticos para planificar, administrar y controlar las operaciones de maquinaria de fabricación.

El proceso de impresión de un objeto en 3D consta de varios pasos generales⁹, comienza con la utilización de un software

de diseño asistido por computadora (CAD) para crear y editar un prototipo virtual que puede exportarse como un archivo compatible con una impresora 3D. El objeto 3D que se va a imprimir se corta virtualmente en una pila de cortes delgados bidimensionales (2D), cuyo grosor se basa en la resolución de la impresora y la velocidad de impresión deseada. Luego se codifica una hoja de ruta de cada segmento 2D y se transfiere a la impresora. La impresión comienza capa por capa (2D) desde la base del objeto y termina en la parte superior hasta lograr un objeto en 3D, siendo esto guiado por el software CAD¹⁰. La resolución o complejidad de cada objeto impreso depende no solo de la capacidad de distribuir y utilizar los materiales de impresión, sino también de la calidad de los datos CAD utilizados. Cuanto más complejo es el modelo estructural deseado, más datos radiográficos se requieren⁵.

Actualmente se utilizan datos volumétricos obtenidos a partir de tomografía computarizada (TC), resonancia magnética incluso de imágenes de ultrasonido^{5,6}. Los conjuntos de datos de estas modalidades se almacenan en el formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*), desde los cuales los programas CAD pueden generar modelos. Primero, el software CAD selecciona porciones pertinentes de las imágenes obtenidas del archivo DICOM para someterse a la extracción (también llamado segmentación), seguida de edición selectiva¹¹. Durante la segmentación, el área o volumen deseado de la imagen se delinea para ser seleccionado y aislado individualmente para su uso, existiendo varios métodos de selección: manualmente por el usuario o mediante algoritmos que permiten la selección automática basada en las características de píxeles individuales¹². Después de esto, los datos volumétricos se convierten a uno compatible para 3D y se exportan como un archivo compatible, como .STL. Así, las impresoras 3D pueden usar estos datos para crear objetos de acuerdo con lo diseñado previamente. La creación de archivos .STL mediante estos procesos estandarizados permiten la colaboración en el diseño de modelos debido a que pueden ser compartidos públicamente en bases de datos como la del *National Institutes of Health's 3D Print Exchange*.

Usos del modelado en 3D para entrenamiento en otorrinolaringología

La tecnología de impresión 3D permite la creación de modelos anatómicamente precisos y complejos de cabeza y cuello, con el objetivo del entrenamiento quirúrgico, lo cual, a diferencia de la simulación en realidad virtual, permite la práctica con instrumentos físicos. En la literatura encontramos múltiples ejemplos de las aplicaciones en entrenamiento que se han desarrollado en los últimos años.

Modelos de hueso temporal y cirugía de oído

El modelo de hueso temporal ha sido uno de los modelos más utilizados debido a la creciente dificultad para acceder a material cadavérico, la compleja anatomía de este hueso, su relación con otras estructuras y una curva de aprendizaje quirúrgica importante. En relación con el primer punto, hay que considerar que un número adecuado de huesos temporales cadavéricos es difícil de adquirir, requiere un laboratorio especializado que implica una cantidad significativa de preparación y limpieza después de su uso, así como el riesgo inherente de infección al manipular tejidos biológicos¹³.

Están publicados múltiples ejemplos de producción de modelos en la literatura, con distintas tecnologías, con diversos estudios experimentales de simulación y entrenamiento quirúrgico, donde la mayoría de los estudios reportan principalmente *outcomes* subjetivos en relación con la sensación de realidad y utilidad de los modelos como parte de su formación. Podemos describir modelos generados mediante SLA en base a material cadavérico, con coloreado de estructuras, el cual presentaba una buena correlación anatómica con el original, pero algunas deficiencias como menor aireación de la mastoides y menor dureza en relación al hueso temporal⁴. Cohen y cols generaron modelos impresos por FDM con agujeros de drenaje para lograr una mejor neumatización de las celdillas mastoideas, pero reportando una tendencia del material a derretirse con el fresado frente a una irrigación insuficiente^{4,14}. Mediante tecnología *Binder Jetting* con polvo de yeso, Da Cruz y cols obtuvieron un modelo de hueso temporal sobre el cual 9 residentes con experiencia previa en

material cadavérico realizaron ejercicios, con positivas calificaciones en percepción de realidad y anatomía, pero menores en contraste y sensación háptica¹⁵. Rose y cols reportan dos modelos creados mediante tecnología MJ, generados con varios materiales, con distintos colores y en base a 2 tipos de imagen distintas, obteniendo grados de detalle diferentes^{7,15}. A nivel nacional, Cohen presenta 2 modelos (adulto y pediátrico) donde se realizan ejercicios de disección, pero con limitaciones por la falta de tejidos blandos, huesos de la cadena y la transparencia del material del modelo¹⁶. *The American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery Foundation's 3D-Printed Temporal Bone Working Group* publicó un estudio multi institucional comparando distintas impresoras y materiales, donde aquellos modelos producidos mediante SLA obtuvieron los mayores puntajes, pero describiéndose un promedio de 2.4 (en escala hasta 5) en el ámbito de herramienta de ensayo quirúrgica¹⁷.

Además de modelos de hueso temporal, se han realizado modelos de oído medio como el presentado por Monfared y cols, con dimensiones similares al del ser humano, con materiales que simulaban tejidos blandos y óseos, donde otorrinolaringólogos realizaban una estapedostomía, describiendo que el 87% de los participantes refirieron que sería muy útil para entrenamiento de los residentes¹⁸. Para entrenamiento en cirugía endoscópica de oído en población pediátrica, Barber y cols reportan un modelo de cirugía de endoscópica de oído transcanal asistido por impresión 3D, donde se reportó una reducción del tiempo requerido para realizar ciertas tareas no quirúrgicas (posicionar una argolla en una clavija) a través del modelo impreso, sin embargo, este modelo no posee asociación anatómica y fue más bien una prueba de validez de constructo¹⁹. Chang y cols presentaron un curso de preparación en patología pediátrica mediante simulación con modelos de varias condiciones (microtia, fisura palatina, fisura labial) donde los participantes debían realizar simulaciones quirúrgicas como trabajo en modelo de cartílago costal para uso en reconstrucción de vía aérea, obteniendo un aumento significativo en la confianza y sensación de pericia de los participantes²⁰. Berens y cols publican sobre un modelo de cartílago costal en base a almidón y silicona, generado

desde un molde negativo hecho por impresión 3D el cual es comparado en relación con uno de material comercial por cirujanos expertos en microtia quienes lo tallan simulando una reconstrucción de pabellón auricular, reportándose una mayor similitud de aquel en base a almidón y silicona, el cual además es de menor costo²¹. Sparks y cols nos presentan un modelo de oído medio y canal auditivo externo, en el cual estudiantes de medicina sin experiencia quirúrgica previa realizaban una miringotomía e instalación de tubo de ventilación, con una capacitación teórica previa. El autor describe que el 95% de los participantes encontró que la experiencia era aplicable a su entrenamiento médico, y que presentaban una mejoría en su eficiencia y aptitud técnica con la práctica²².

En un estudio con 10 residentes de ORL, se realizó disección de modelo cadavérico del hueso temporal seguido por un modelo 3D. Los participantes calificaron los modelos en varios parámetros, incluida la "utilidad en el desarrollo de habilidades" y "percepción del valor educativo" en una escala Likert de 7 puntos. Los participantes reportaron que el modelo 3D fue favorable en comparación con el modelo cadavérico en varias medidas relacionadas con las características físicas, utilidad en la adquisición de habilidades quirúrgicas y percepción educativa, coincidiendo todos los participantes en la necesidad de incorporar el modelo al laboratorio de hueso temporal²³. Este trabajo se asemeja a aquellos que han reportado una posición favorable a la utilización de modelos de simulación 3D en otras especialidades quirúrgicas²⁴.

Modelos de vía aérea

Como una forma de poder realizar entrenamiento en escenarios de patologías poco frecuentes y de alto riesgo, Kavanagh y cols. generaron modelos de laringe pediátrica basados en anatomía normal y patológica (laringomalacia, estenosis subglótica, hendidura laríngea, quiste subglótico). Éstos se produjeron en distintos materiales mediante impresión 3D directa o mediante la impresión de un molde negativo el cual fue posteriormente rellenado con elastómero de silicona, siendo este último el mejor evaluado en sus características al ser manipulado²⁵. También está descrito un modelo de laringe para tiroplastia

de inyección mediante abordaje transcervical, el cual contaba con un material conductivo a nivel del músculo tiroaritenoides, lo que permitía tener un feedback auditivo cuando se punciona el correctamente, mejorando los niveles de confort en el procedimiento de los participantes con menor experiencia²⁶.

Modelos de cirugía nasosinusal y base de cráneo

Considerando lo complejo del entrenamiento en cirugía endoscópica nasal y de base de cráneo, encontramos en la literatura la experiencia de modelos fabricados en materiales rígidos para la práctica de navegación espacial con endoscopio, la impresión de piezas individuales en distintos materiales, los cuales posteriormente son ensamblados para lograr una representación más fiel en forma y sensación háptica a la original al momento de ser instrumentalizados^{27,28}. Narayanan y cols generaron un modelo multimaterial en base a imágenes de un paciente con invaginación basilar, donde equipos de 3 otorrinolaringólogos debían realizar pasos claves que iban desde instalación del neuronavegador hasta exposición de la dura a nivel del clivus, obteniendo como consenso que el modelo era realista y útil en el aprendizaje de este procedimiento²⁹. Yoshiyasu y cols validan un modelo para simulación de múltiples procedimientos de cirugía endoscópica nasal, que tiene la ventaja de ser de rápida impresión y de costo bajo (20.55 dólares al momento de la publicación)³⁰.

En un modelo 3D de cirugía endoscópica endonasal transfenoidal diseñado para acelerar la curva de aprendizaje de neurocirujanos y residentes con distinto grado de experiencia quirúrgica, se evaluó el tiempo de realización de tareas básicas como fresado, curetaje y aspiración. Se reportó que aquellos que tenían solo experiencia como cirujanos asistentes y observadores mejoraron los tiempos de realización de los procedimientos de acuerdo con el número de intentos en relación con aquellos experimentados donde no hubo cambio. Este estudio también mostró validez de constructo, pero no tuvo un grupo control para evaluar si el entrenamiento fue superior a no tenerlo^{19,31}.

La septoplastia es un procedimiento desafiante de aprender y enseñar por el es-

trecho espacio en que se opera, dificultando la visualización simultánea del estudiante y el docente. AlReefi y cols, y Zabaneh y cols. crearon modelos de anatomía nasal con múltiples materiales que buscaban representar tejidos blandos, huesos y cartilago, para el entrenamiento en realización de septoplastia endoscópica y rinoplastia³². Ho y cols generaron un modelo de entrenamiento en osteotomías para rinoplastia de bajo costo mediante *FDM*³³.

Cirugía de cabeza y cuello y reconstrucción maxilomandibular

Uno de los usos de mayor desarrollo en los últimos años es la utilización de modelos 3D para planificación quirúrgica y reconstrucción, principalmente mandibular y maxilar, luego de cirugías oncológicas de cabeza y cuello y trauma maxilofacial grave, entre otros. En esta área, se utilizan los mismos principios descritos previamente, diseñando un modelo de la mandíbula del paciente previo a la cirugía oncológica con el fin de guiar la reconstrucción del defecto con placas de titanio y/o con colgajo libre de fíbula. En relación con los beneficios reportados del uso de estas técnicas de impresión 3D se encuentran³⁴: i) reducción del tiempo quirúrgico en hasta 1,5-2 horas para los casos de reconstrucción con colgajo libre de fíbula, lo cual se relaciona con menor morbilidad, especialmente la potencial disminución del riesgo de infecciones del sitio quirúrgico, y ii) disminución del tiempo de isquemia del colgajo de fíbula en hasta 73 minutos, siendo una reducción del tiempo de isquemia un factor de buen pronóstico para la viabilidad de un colgajo. Si bien esta herramienta se constituye como una alternativa útil por lo mencionado previamente, aún existen algunas desventajas tales como: a) costos de su implementación y financiamiento técnico y de materiales; b) ausencia de estudios de costo-efectividad que evalúen su impacto en términos hospitalarios y económicos.

Han y cols.³⁵ presentaron el uso de andamios diseñados e impresos en 3D utilizando material biocompatible y biodegradable (*polycaprolactona*) para la reconstrucción de defectos maxilares en pacientes que recibieron cirugía oncológica, logrando mejoría estética. En este reporte, el modelo impreso

fue ocupado a su alrededor por tejido blando, pero sin la creación o recolonización de tejido óseo.

Kumta y cols³⁶ utilizaron en su trabajo la técnica 3D de estereolitografía para planeamiento quirúrgico en reconstrucción mandibular mediante colgajo libre. Destaca la generación de modelos mandibulares completos, en los cuales se reemplaza el segmento afectado con una imagen en espejo del lado mandibular normal. De forma similar, Singare y cols³⁷ nos presenta una serie de casos de implantes en reconstrucción de defectos nasales, mandibulares y maxilares mediante uso de tecnología de impresión 3D, en los cuales el modelo creado se utiliza para planeamiento, ajuste y creación de prótesis pre-cirugía en materiales biocompatibles clásicos (como el titanio), logrando mejores resultados, menor pérdida de sangre y recuperación más expedita. En estos estudios se destaca el diseño de la neo-mandíbula basándose en una imagen especular del lado sano, por lo que ofrece un buen resultado estético.

Yang y cols³⁸ presentaron su experiencia con la impresión 3D como una alternativa al moldeado habitual de las placas en el periodo intraoperatorio usadas en reconstrucción. Presentaron 3 casos en que se realizó la creación de guías quirúrgicas y placas de titanio personalizadas mediante la tecnología de sinterización selectiva por láser, logrando simplificar la fijación del hueso, evitando el moldeado de la placa intraoperatorio, sin reportar complicaciones y con buena precisión quirúrgica.

Limitaciones actuales

Probablemente el factor más importante que ha dificultado la implementación de la impresión 3D corresponde a los costos que conllevan la adquisición del software, hardware y materiales necesarios. No obstante, los precios asociados han disminuido en el tiempo, especialmente para aquellos materiales utilizados para imprimir en 3D con fines educativos y en aquellos casos en que se logra centralizar las unidades de impresión para grandes centros educativos u hospitalarios⁶.

Existe la aprensión de que estos modelos

no logran sustituir por completo la experiencia de interactuar con tejido humano. Sin embargo, el uso de modelos impresos en 3D reducen potencialmente la dependencia de la adquisición de material cadavérico, siendo una alternativa aceptable según lo reportado en la literatura^{7,23}.

Otras preocupaciones con la implementación de la impresión 3D incluyen el tiempo necesario para obtener formatos de imagen adecuados, personal dedicado para la programación y resolución de problemas de la impresora; el espacio físico y el tiempo necesarios para imprimir, los cuales han disminuido a lo largo del tiempo. La cantidad de post procesamiento requerido para eliminar el exceso de material y trabajar detalles como el suavizado de bordes varían según el tipo de impresora y sustrato, pero no es despreciable⁵. Un aspecto de la impresión 3D que puede ralentizar significativamente su implementación es el tiempo necesario para dominar el diseño CAD y planificación de impresión. En general, la capacidad de producir 3D de calidad requiere de la experiencia obtenida por ensayo y error con el software CAD.

De forma importante, cabe señalar que una gran parte de los estudios publicados a la fecha, incluidos muchos presentados aquí, son modelos experimentales que no han sido validados por estudios a gran escala o ensayos controlados aleatorios. Así, si bien las potenciales aplicaciones de estos trabajos son alentadoras, se debe tener precaución al interpretar el impacto actual, la rentabilidad o el uso futuro de la impresión 3D en la práctica clínica. En la actualidad existe una gran gama de dispositivos de impresión 3D junto a otros en etapas de desarrollo, lo cual dificulta hacer comparaciones entre ellos. Además, aún existen dificultades para la evaluación y medición objetiva de competencias quirúrgicas. Actualmente existen algunas escalas de medición de habilidades técnicas (OSATS) para mastoidectomía³⁹. No obstante, algunas están incompletas en relación con la incorporación de estructuras importantes para disección, por ejemplo: nervio facial, antro mastoideo, ángulo sinodural, cavidad timpánica y huesecillos, tegmen, receso del facial, canales semicirculares, ranura digástrica como también la evaluación del fresado directo⁴⁰.

Conclusión

La tecnología de impresión 3D se ha posicionado como una herramienta facilitadora en la creación de nuevas estrategias de entrenamiento quirúrgico, ayudando a ampliar el acceso a escenarios de práctica clínica complejos que se encuentran limitados por la necesidad de brindar una atención a los pacientes más segura, con personal experimentado y con menor margen de error. La creciente disponibilidad de nuevas tecnologías y materiales de impresión 3D, con distintos perfiles de uso, propiedades y capacidades, asociado a costos en disminución con un creciente acceso al público general, nos anticipa un aumento en la ya amplia y creciente literatura de modelos de simulación, donde esperamos avanzar en la resolución de las limitaciones antes descritas.

Bibliografía

- Fennessy BG, O'Sullivan P. Establishing a temporal bone laboratory: considerations for ENT specialist training. *Irish Journal of Medical Science*. 2009;178(4). doi: 10.1007/s11845-009-0373-x
- Haffner M, Quinn A, Hsieh TY, Strong EB, Steele T. Optimization of 3D Print Material for the Recreation of Patient-Specific Temporal Bone Models. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2018;127(5):338-343. doi: 10.1177/0003489418764987
- 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
- Bakhos D, Velut S, Robier A, al zahrani M, Lescanne E. Three-Dimensional Modeling of the Temporal Bone for Surgical Training. *Otology & Neurotology*. 2010;31(2). doi: 10.1097/MAO.0b013e3181c0e655
- Marro A, Bandukwala T, Mak W. Three-Dimensional Printing and Medical Imaging: A Review of the Methods and Applications. *Curr Probl Diagn Radiol*. 2016;45(1):2-9. doi: 10.1067/j.cpradiol.2015.07.009
- Crafts TD, Ellsperman SE, Wannemuehler TJ, Bellicchi TD, Shipchandler TZ, Mantravadi A v. Three-Dimensional Printing and Its Applications in Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*. 2017;156(6). doi: 10.1177/0194599816678372
- Rose AS, Kimbell JS, Webster CE, Harrysson OLA, Formeister EJ, Buchman CA. Multi-material 3D Models for Temporal Bone Surgical Simulation. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*. 2015;124(7). doi: 10.1177/0003489415570937
- Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Accessed December 12, 2020. <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>
- VanKoeveering KK, Malloy KM. Emerging Role of Three-Dimensional Printing in Simulation in Otolaryngology. *Otolaryngol Clin North Am*. 2017;50(5):947-958. doi: 10.1016/j.otc.2017.05.006
- Gross BC, Erkal JL, Lockwood SY, Chen C, Spence DM, Gates R. Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. Published online 2014. doi: 10.1021/ac403397r
- Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligk H, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2010;5(4):335-341. doi: 10.1007/s11548-010-0476-x
- John NW. Segmentation of Radiological Images. In: *Image Processing in Radiology*. Springer Berlin Heidelberg; 2007:45-54. doi: 10.1007/978-3-540-49830-8_4
- Chien WW, da Cruz MJ, Francis HW. Validation of a 3D-printed human temporal bone model for otology surgical skill training. *World Journal of Otorhinolaryngology - Head and Neck Surgery*. 2021;7(2):88-93. doi: 10.1016/j.wjorl.2020.12.004
- Cohen J, Reyes SA. Creation of a 3D printed temporal bone model from clinical CT data. *Am J Otolaryngol*. 2015;36(5):619-624. doi: 10.1016/j.amjoto.2015.02.012
- da Cruz MJ, Francis HW. Face and content validation of a novel three-dimensional printed temporal bone for surgical skills development. *J Laryngol Otol*. 2015;129 Suppl 3:S23-9. doi: 10.1017/S0022215115001346
- Mauricio Cohen V Claudio Callejas C Patricio García S JCL. Confección de prototipos artificiales de hueso temporal en Chile. *Rev Otorrinolaringol Cir Cabeza Cuello*. 2005;65:9-14. [https://www.sochiorl.cl/uploads/02\(18\).pdf](https://www.sochiorl.cl/uploads/02(18).pdf)
- 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. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*. 2021;164(5):1077-1084. doi: 10.1177/0194599820960474
- Monfared A, Mitteramskogler G, Gruber S, Salisbury Jr JK, Stampfl J, Blevins NH. High-fidelity, inexpensive surgical middle ear simulator. *Otol Neurotol*. 2012;33(9):1573-1577. doi: 10.1097/MAO.0b013e31826dbca5
- Barber SR, Kozin ED, Dedmon M, et al. 3D-printed pediatric endoscopic ear surgery simulator for surgical training. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2016;90:113-118. doi: 10.1016/j.ijporl.2016.08.027

20. Chang B, Powell A, Ellsperman S, et al. Multicenter Advanced Pediatric Otolaryngology Fellowship Prep Surgical Simulation Course with 3D Printed High-Fidelity Models. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*. 2020;162(5):658-665. doi: 10.1177/0194599820913003
21. Berens AM, Newman S, Bhrany AD, Murakami C, Sie KCY, Zopf DA. Computer-Aided Design and 3D Printing to Produce a Costal Cartilage Model for Simulation of Auricular Reconstruction. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2016;155(2):356-359. doi: 10.1177/0194599816639586
22. Sparks D, Kavanagh KR, Vargas JA, Valdez TA. 3D printed myringotomy and tube simulation as an introduction to otolaryngology for medical students. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2020;128:109730. doi: 10.1016/j.ijporl.2019.109730
23. 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
24. Langridge B, Momin S, Coumbe B, Woin E, Griffin M, Butler P. Systematic Review of the Use of 3-Dimensional Printing in Surgical Teaching and Assessment. *J Surg Educ*. 2018;75(1):209-221. doi: 10.1016/j.jsurg.2017.06.033
25. Kavanagh KR, Cote V, Tsui Y, Kudernatsch S, Peterson DR, Valdez TA. Pediatric laryngeal simulator using 3D printed models: A novel technique. *Laryngoscope*. 2017;127(4):E132-E137. doi: 10.1002/lary.26326
26. Ainsworth TA, Kobler JB, Loan GJ, Burns JA. Simulation model for transcervical laryngeal injection providing real-time feedback. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2014;123(12):881-886. doi: 10.1177/0003489414539922
27. Chan HHL, Siewerdsen JH, Vescan A, Daly MJ, Prisman E, Irish JC. 3D Rapid Prototyping for Otolaryngology-Head and Neck Surgery: Applications in Image-Guidance, Surgical Simulation and Patient-Specific Modeling. *PLoS One*. 2015;10(9):e0136370. doi: 10.1371/journal.pone.0136370
28. Chang DR, Lin RP, Bowe S, et al. Fabrication and validation of a low-cost, medium-fidelity silicone injection molded endoscopic sinus surgery simulation model. *Laryngoscope*. 2017;127(4):781-786. doi: 10.1002/lary.26370
29. Narayanan V, Narayanan P, Rajagopalan R, et al. Endoscopic skull base training using 3D printed models with pre-existing pathology. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 2015;272(3):753-757. doi: 10.1007/s00405-014-3300-3
30. Yoshiyasu Y, Chang DR, Bunegin L, et al. Construct validity of a low-cost medium-fidelity endoscopic sinus surgery simulation model. *Laryngoscope*. 2019;129(7):1505-1509. doi: 10.1002/lary.27748
31. Wen G, Cong ZX, Liu KD, et al. A practical 3D printed simulator for endoscopic endonasal transsphenoidal surgery to improve basic operational skills. *Child's Nervous System*. 2016;32(6):1109-1116. doi: 10.1007/s00381-016-3051-0
32. AlReefi MA, Nguyen LHP, Mongeau LG, et al. Development and validation of a septoplasty training model using. *Int Forum Allergy Rhinol*. 2017;7(4):399-404. doi: 10.1002/alar.21887
33. G Z, R L, A G, G W. Rhinoplasty: a hands-on training module. *Plast Reconstr Surg*. 2009;124(3):952-954. doi: 10.1097/PRS.0B013E3181B17BF5
34. Dupret-Bories A, Vergez S, Meresse T, Brouillet F, Bertrand G. Contribution of 3D printing to mandibular reconstruction after cancer. *Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis*. 2018;135(2):133-136. doi: 10.1016/j.anorl.2017.09.007
35. Han HH, Shim JH, Lee H, et al. Reconstruction of Complex Maxillary Defects Using Patient-specific. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2018;6(11):e1975. doi: 10.1097/GOX.0000000000001975
36. Kumta S, Kumta M, Jain L, Purohit S, Ummul R. A novel 3D template for mandible and maxilla reconstruction: Rapid prototyping using stereolithography. *Indian J Plast Surg*. 2015;48(3):263-273. doi: 10.4103/0970-0358.173123
37. Singare S, Shenggui C, Sheng L. The use of 3D printing technology in human defect reconstruction-a review of cases study. *Med Res Innov*. 2017;1(2). doi: 10.15761/MRI.1000109
38. Yang WF, Choi WS, Leung YY, et al. Three-dimensional printing of patient-specific surgical plates in head and neck reconstruction: A prospective pilot study. *Oral Oncol*. 2018;78:31-36. doi: 10.1016/j.oraloncology.2018.01.005
39. Laeeq K, Bhatti NI, Carey JP, et al. Pilot testing of an assessment tool for competency in mastoidectomy. *Laryngoscope*. 2009;119(12):2402-2410. doi: 10.1002/lary.20678
40. Sethia R, Kerwin TF, Wiet GJ. Performance Assessment for Mastoidectomy: State of the Art Review. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*. 2017;156(1):6169. doi: 10.1177/0194599816670886