

Guía práctica de planificación e impresión 3D en Ortopedia y Traumatología

Bruno Gobbato,* Daniel Moya, Fernando Menor Fusaro,# Sergio Valente##**

*Departamento de Cirugía Ortopédica, Hospital São José, Jaraguá do Sul, SC, Brasil

**Servicio de Ortopedia y Traumatología. Hospital Británico de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

#Istituto Pediatrico della Svizzera Italiana (IPSI), Bellinzona, Suiza

##Servicio de Ortopedia y Traumatología, Hospital "Dr. Pedro T. Orellana", Trenque Lauquen, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

El acceso a la tecnología de planificación e impresión 3D está destinado a tener un impacto disruptivo en la práctica quirúrgica de la Ortopedia y Traumatología. Sus ventajas incluyen una mejor comprensión de las lesiones por tratar, mayor precisión técnica, acortamiento de los tiempos quirúrgicos, disminución de la pérdida sanguínea y menor exposición a los rayos. El objetivo de esta publicación es ofrecer una guía práctica paso a paso tomando como ejemplo el tratamiento de una fractura desplazada del tercio medio de la clavícula.

Palabras clave: Planificación preoperatoria 3D; impresión 3D; guías intraoperatorias personalizadas; fractura de clavícula.

Nivel de Evidencia: V

Practical Guide to 3D Printing and Planning in Orthopedics and Traumatology

ABSTRACT

Access to 3D planning and printing technology is destined to have a disruptive impact on the surgical practice of Orthopedics. Its advantages include a better understanding of the injuries, greater technical precision, shortened surgical times, decreased blood loss, and less exposure to X-rays. The aim of this publication is to provide a practical step-by-step guide using the treatment of a displaced middle-third clavicle fracture as an example.

Key words: 3D preoperative planning; 3D printing; personalized intraoperative guides; clavicle fracture.

Level of Evidence: V

INTRODUCCIÓN

La impresión en tres dimensiones incluye un grupo de tecnologías por medio de las cuales es posible generar objetos tridimensionales (3D) a partir de información bidimensional.

En el ámbito de la medicina, la opción de replicar la anatomía en forma 3D, en dispositivos electrónicos y poder luego imprimirlos, otorga una posibilidad enorme para comprender las lesiones por tratar y planificar los procedimientos.^{1,2}

Las aplicaciones de esta técnica en el campo de la Ortopedia y Traumatología incluyen el diagnóstico, la planificación quirúrgica, la creación de guías intraoperatorias, la creación de implantes personalizados, el entrenamiento quirúrgico, la impresión de ortesis y prótesis, y la bioimpresión.¹⁻⁴

El objetivo de esta publicación es ofrecer una guía paso a paso para realizar una planificación preoperatoria y la impresión del modelo y de guías personalizadas. Utilizaremos como ejemplo un procedimiento de osteosíntesis de fractura de clavícula. Algunas publicaciones recientes informan sobre la utilidad de esta técnica en el tratamiento de las fracturas desplazadas de clavícula y sus secuelas.⁵⁻⁹

Recibido el 6-8-2021. Aceptado luego de la evaluación el 19-8-2021 • Dr. BRUNO GOBBATO • bgobbato@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7779-0659>

Cómo citar este artículo: Gobbato B, Moya D, Menor Fusaro F, Valente S. Guía práctica de planificación e impresión 3D en Ortopedia y Traumatología. *Rev Asoc Argent Ortop Traumatol* 2022;87(1):122-130. <https://doi.org/10.15417/issn.1852-7434.2022.87.1.1416>

DESDE LA OBTENCIÓN DE IMÁGENES HASTA LA IMPRESIÓN 3D

El proceso que termina en la creación de un modelo 3D tiene varias etapas (Figura 1).

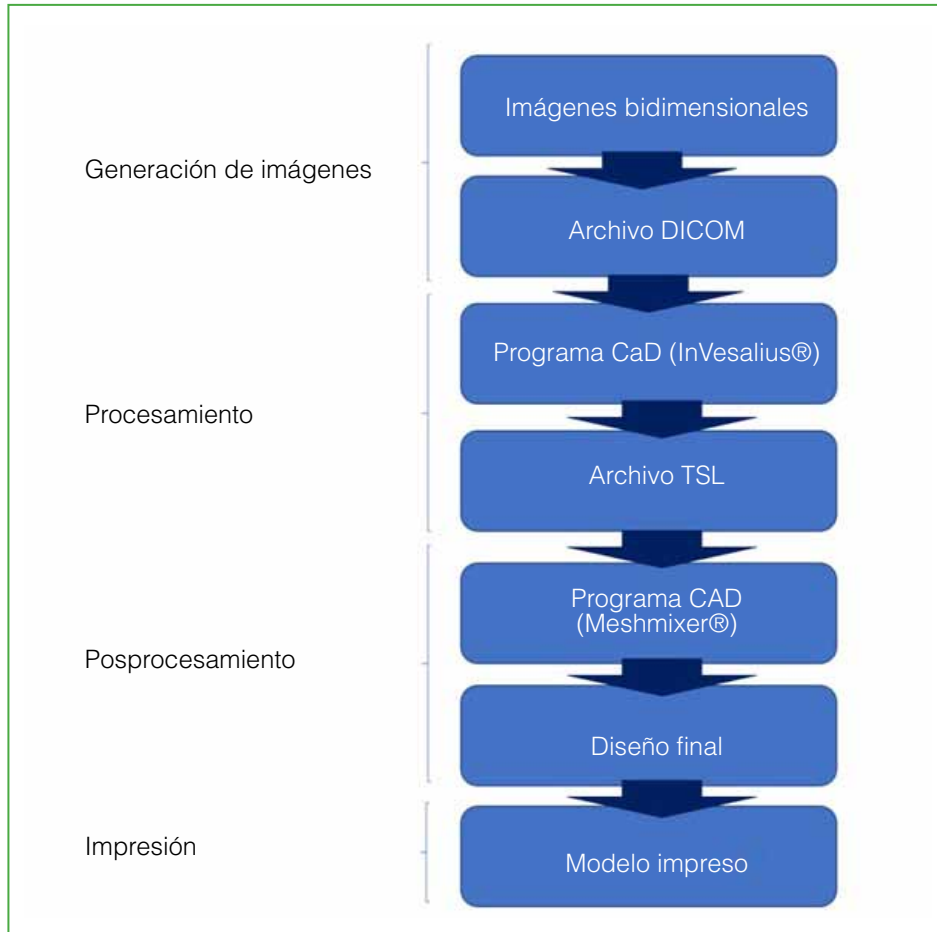


Figura 1. Etapas desde la generación de imágenes hasta el modelo impreso terminado.

Generación de imágenes

El primer paso es la adquisición de las imágenes. Estas deberán cumplir requisitos mínimos de resolución, superposición y grosor de los cortes para poder ser procesadas. En el campo de la Ortopedia y Traumatología, habitualmente, se utilizan los estudios de tomografía computarizada (TC), aunque también podrían usarse las imágenes de ecografías y resonancias magnéticas.² En este último caso, el resonador deberá ser configurado de manera adecuada para no perder resolución.

La información generada por la TC es transferida a nuestra computadora utilizando un archivo DICOM. Este es un protocolo estándar de comunicación entre sistemas de información y, a la vez, un formato de almacenamiento de imágenes médicas desarrollado por el *American College of Radiology* en asociación con la *National Electrical Manufacturers Association* de los Estados Unidos.

Este lenguaje de comunicación DICOM estandariza el formato de las imágenes de diferentes equipos (TC, resonancia magnética, ecografía) haciéndolo compatible con otros dispositivos.

Procesamiento: ¿cómo convertir los archivos DICOM en imágenes 3D?

La transformación y el diseño de las imágenes se realizan con programas para la reconstrucción de imágenes de TC y resonancia magnética. Se trata de programas de diseño asistido por computadora. Estos se conocen como CAD (*Computer-Aided Design*). Permiten transformar el archivo original DICOM en un archivo STL. Un buen ejemplo de este tipo de “software” que se encarga de “apilar” los cortes de imágenes es el programa InVesalius®. Se puede descargar gratuitamente de la red¹⁰ y utilizarlo tanto con Mac® como con Windows®. Otra opción es el programa Horos®, pero en este caso, es específico para Mac®, se puede descargar gratis de la red.¹¹ Otra opción muy popular es el programa 3DSlicer®, también de acceso gratuito.¹²

Una opción paga es el programa Mimics®,¹³ muy versátil, está aprobado por la *Food and Drug Administration* y cuenta con el timbrado CE (Comunidad Europea).

Por medio de estos programas se pueden transformar las imágenes en dos dimensiones de la TC en un modelo 3D virtual. El archivo STL resultante es una malla de triángulos que permite definir la superficie y la forma de un objeto. Cuanto menor tamaño tengan los triángulos o teselas (mosaicos) de esa malla, mayor será la resolución del objeto y mayor el peso del archivo. La sigla STL corresponde a *Surface Tessellation Language* (Lenguaje de Superficies de Teselas) o también a *Standard Triangle Language* (Lenguaje Estándar de Triángulos).

Los pasos principales de esta etapa son:

a) Importación de las imágenes: el primer paso consiste en importar los archivos DICOM al programa de procesamiento. Estos archivos son entregados por los centros de imágenes habitualmente en un disco compacto o enviados por vía electrónica. En el caso que tomamos como ejemplo, podremos ver las imágenes habituales de TC por medio del programa de procesamiento InVesalius® (Figura 2A).

Para procesar las imágenes de las TC se seleccionan las imágenes de los cortes axiales. Habitualmente son dos archivos, las llamadas “ventana de partes blandas” y la “ventana ósea”. Se debe seleccionar (Figura 2B) e importar la primera, es decir, la “ventana de partes blandas”.

b) Selección de áreas de interés (Segmentación): en este paso, se seleccionarán los sectores óseos para poder visualizar adecuadamente la clavícula y se descartarán las partes blandas. El programa permite, mediante un control de desplazamiento situado a la izquierda de la pantalla (Figura 2C), limitar la selección a las estructuras óseas. Lo seleccionado se verá en color verde (Figura 2D).

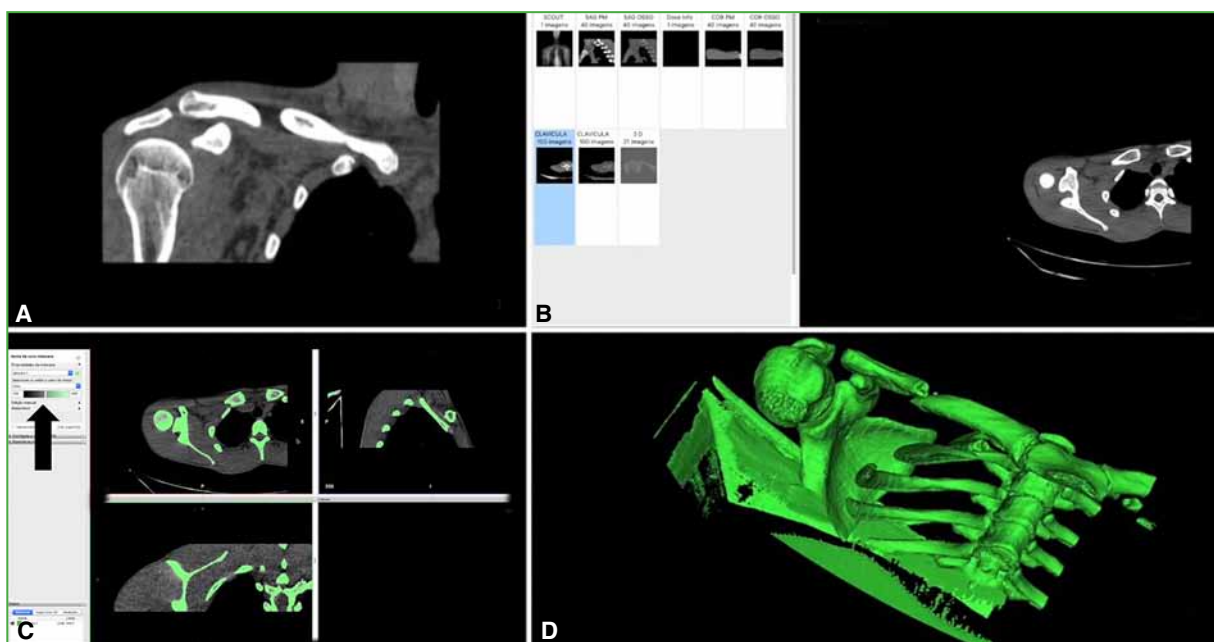


Figura 2. A. Imagen de tomografía computarizada. B. Selección de ventana de partes blandas. C. Selección de estructuras óseas (flecha negra). D. Estructuras seleccionadas.

Habitualmente está entre los valores de 170 a 200 píxeles de la ventana de selección. De esta manera, se seleccionarán todos los cortes de la TC creando un modelo 3D. El resultado es un modelo 3D digital que puede ser manipulado y orientado en distintas posiciones en el espacio (Figura 3).

c) Exportar el modelo 3D: el paso final de la etapa de procesamiento consiste en guardar el archivo en formato STL.

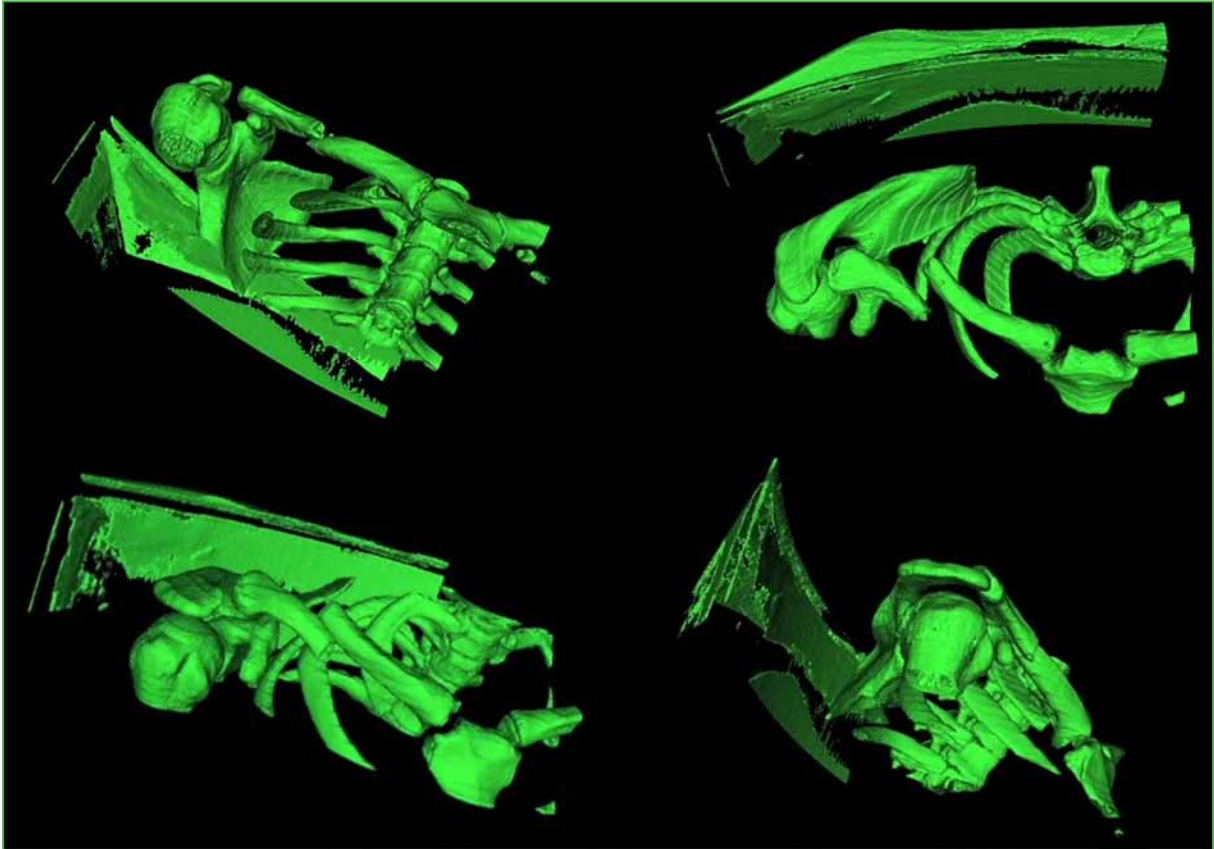


Figura 3. Modelo manipulable en todos los planos del espacio virtual.

Posprocesamiento: preparación del modelo para planificar e imprimir

El formato STL define la geometría de objetos, pero a diferencia de otros tipos de archivos, no incluye detalles de color, textura o propiedades físicas. Es un formato adecuado para realizar un prototipado rápido, lo que es definido como el grupo de técnicas que permiten fabricar un modelo a escala. Si el objetivo es evaluar las imágenes en forma 3D en la computadora es suficiente, pero si se pretende imprimir el modelo o utilizarlo en una simulación de elementos finitos, será necesario un paso adicional llamado “posprocesamiento”. En este paso, se realizan ajustes para mejorar la calidad del modelo, mediciones y simulaciones quirúrgicas, y se lo deja en condiciones de ser imprimido.

Una buena alternativa para esta etapa del proceso es el programa Meshmixer®, que también puede ser descargado gratuitamente de la red.¹⁴ Se lo ha descrito como un cortaplumas suizo que contiene una serie de herramientas que permiten hacer el acabado final del modelo.¹⁵ Estas funciones incluyen la edición, la reparación e incluso el análisis de la viabilidad de impresión. Puede ser utilizado tanto con Mac® como con Windows®.

Los pasos incluidos en esta etapa son:

- a) Importación del archivo STL: como en la etapa anterior, el primer paso es importar el archivo 3D.
- b) Selección del área de interés: en nuestro caso, la clavícula.

c) Elección de la textura: el programa brinda la opción de elegir entre distintas texturas para la superficie del modelo.

d) Separación de los fragmentos: se deben seleccionar y guardar, en forma independiente, cada uno de los fragmentos para poder manipularlos con libertad y para eventualmente imprimirlos (Figura 4). Este es un paso necesario para imprimir los fragmentos. Para cumplir esta acción se debe seleccionar cada fragmento en forma secuencial, utilizar la herramienta “Separar” del menú y guardarlos por separado.

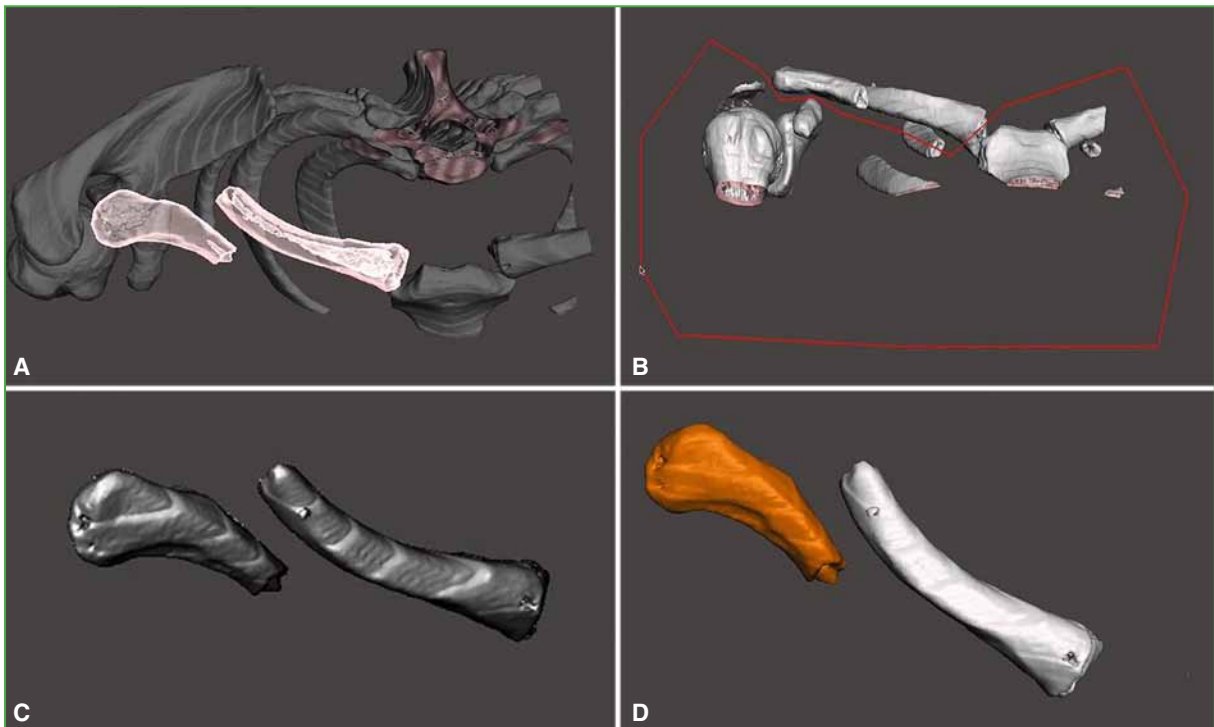


Figura 4. A. Selección de la clavícula. B. Selección del área para eliminar. C. Resultado de la segmentación. D. Selección del fragmento distal.

e) Manipulación de los fragmentos: la herramienta “Transformar” permite mover uno de los fragmentos (previamente seleccionado) en distintas direcciones.

f) Reducción de la fractura: la selección de los fragmentos y la posibilidad de manipularlos permitirán efectuar la reducción de la fractura. Una opción en una fractura de clavícula es seleccionar el fragmento medial y llevarlo hacia el distal. Se selecciona el fragmento medial y, con la herramienta “Transformar”, se puede manipular el fragmento en tres dimensiones. Se puede comenzar con el plano coronal y, una vez obtenida una buena reducción, se pasa a controlar la reducción en el plano axial (Figura 5).

g) Simulación de la osteosíntesis: para realizar la simulación de la osteosíntesis se debe comenzar por la importación del implante. Este puede ser dibujado con un programa de CAD u obtenido de una base de imágenes. Luego se selecciona la placa de osteosíntesis y, con la herramienta de edición “Transformar”, se la manipula en el espacio hasta posicionarla en el lugar preferido con respecto a la clavícula fracturada ya reducida. Es posible rotar el montaje de la placa en la clavícula y observarlo en todos los planos hasta lograr el posicionamiento adecuado (Figura 6). También se podrá medir cada uno de los tornillos (Figura 7).

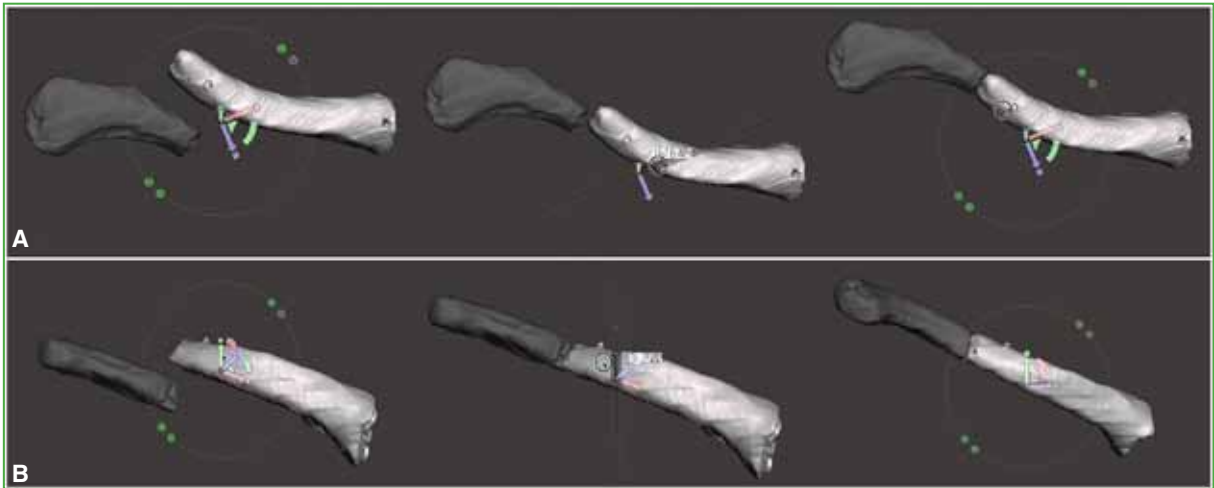


Figura 5. A. Reducción en el plano coronal. B. Reducción en el plano axial.

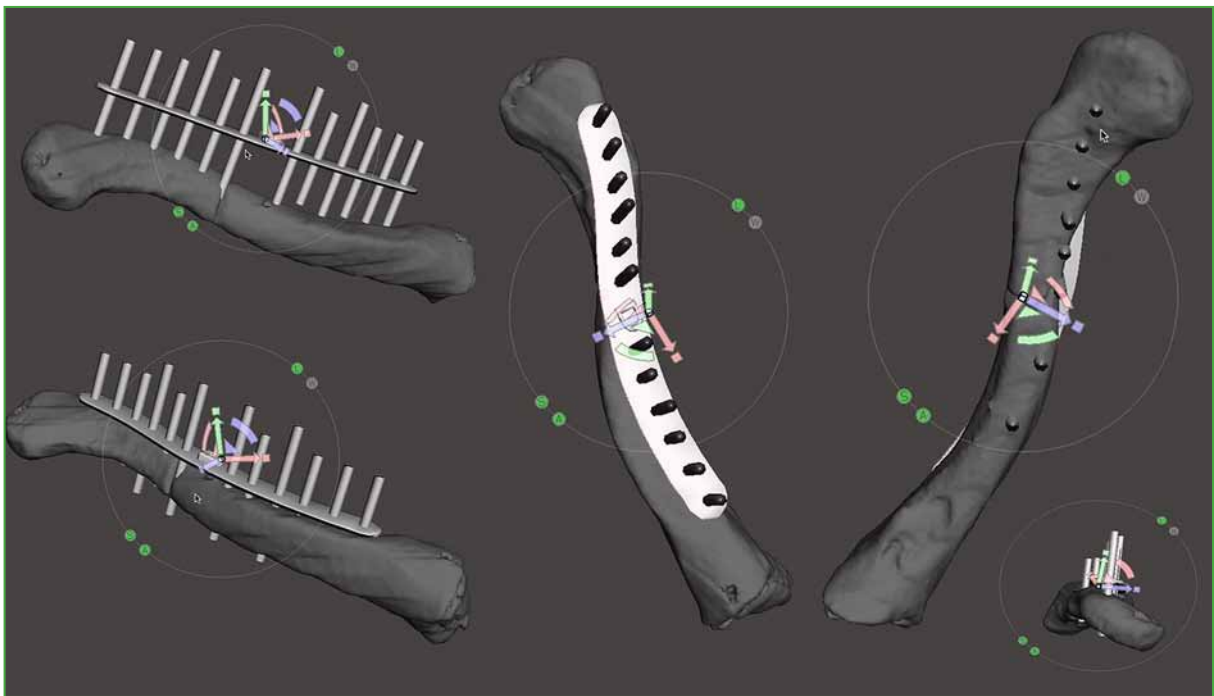


Figura 6. Comprobación del posicionamiento de la placa y los tornillos en distintos planos del espacio.

h) Generación de guías personalizadas: la impresión 3D permite producir guías específicas para casos concretos. Una vez definida la posición de la placa y de los tornillos, lo más importante para generar la guía es la dirección de estos últimos. Por lo tanto, se selecciona y se borra la placa de osteosíntesis dejando a la vista la imagen de los fragmentos óseos y de los tornillos. Luego se seleccionan y guardan, en forma separada, las imágenes del fragmento medial y del fragmento lateral con los tornillos correspondientes, para poder trabajar con más comodidad. Una vez seleccionado uno de los fragmentos, se irá a la herramienta “Meshmix” y se seleccionará “Primitives”, esta sección da la posibilidad de seleccionar entre distintas formas de objeto; en nuestro caso, el más útil es un cubo que se utilizará para construir la guía para los tornillos.

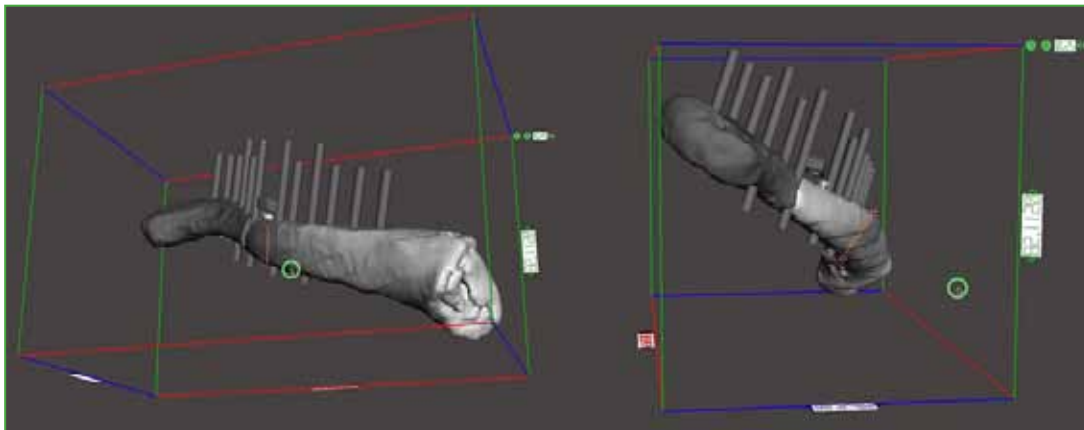


Figura 7. Medición de la longitud de los tornillos.

Una vez seleccionado, el cubo se posiciona sobre la clavícula incluyendo a los tornillos cuya guía nos interesa confeccionar (Figura 8A) y se selecciona “Crear nuevo objeto”. Luego se seleccionan “Editar” y “Transformar” para poder darle la forma deseada a la guía. Así podremos definir la posición y la dirección exactas de los tornillos seleccionados. En el caso del ejemplo, se seleccionan dos tornillos cercanos al foco de fractura, considerando que, al tener su posicionamiento exacto con respecto a la placa, se garantiza el posicionamiento del resto de los tornillos (Figura 8B). El próximo paso consiste en eliminar la imagen de la clavícula, previa selección, utilizando la herramienta “boolean difference”. Así nos quedará aislada la imagen de la guía con los tornillos (Figura 8C). El siguiente paso es eliminar la imagen de los tornillos con la misma herramienta “boolean difference” y la guía quedará terminada (Figura 8D).

El programa Meshmixer® ofrece esta alternativa simple para confeccionar una guía, pero hay opciones mucho más complejas y detalladas.

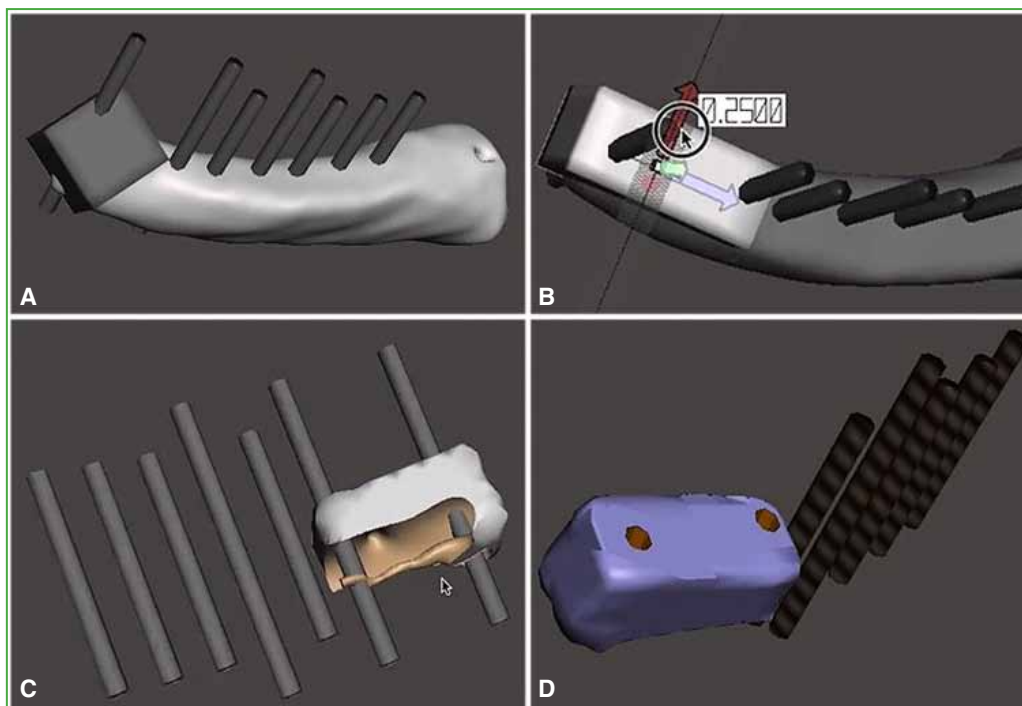


Figura 8. Diseño de la guía personalizada. **A.** Figura geométrica básica. **B y C.** Diseño de la guía incluyendo dos tornillos. **D.** Imagen final de la guía.

Impresión

El paso final, cuando sea necesario, será la impresión del modelo. En este caso, se tendrá una visión 3D más clara y se agregará la sensación táctil. Además, disponer del modelo impreso tiene una gran utilidad educativa y en la transmisión de información a los pacientes.

Si el modelo o las guías van a ser esterilizados para su uso intraoperatorio, se deberá tener especial atención al tipo de material que se utilizará y si este tiene registro sanitario para su uso en cirugía. La esterilización puede alterar las propiedades de los modelos modificando el tamaño de una guía de corte impresa e influyendo en la posición de una osteotomía calculada en la computadora. Estos factores deben ser considerados y previstos.

Para imprimir el modelo 3D será necesario utilizar un programa de laminado donde determinaremos los parámetros de impresión, como altura de capa, temperatura, densidad de relleno, velocidad, entre otros. Entre los programas más populares de laminado, se encuentran Ultimaker Cura¹⁶ y Slic3r¹⁷, ambos gratuitos y compatibles con Windows®, Mac® y Linux®.

La impresora 3D interpreta las coordenadas proporcionadas digitalmente en el archivo STL y lo convierte en un archivo llamado Código G. Divide al archivo STL en una secuencia de cortes transversales horizontales en dos dimensiones de entre 25 a 100 µm, según la técnica utilizada. El objeto será impreso en capas consecutivas comenzando por la base reconstruyéndolo a partir de una serie de capas de dos dimensiones. De esta manera, se imprime una réplica exacta del objeto original.¹⁷

La calidad del programa y de la impresora influirá en las características del producto final. Otra variable por considerar es el tiempo de impresión. Este variará según el volumen y la orientación del modelo, y la resolución de la impresora.² El volumen varía según el “relleno” que se define para el objeto por imprimir.

Tipos de impresora 3D

Existen dos tipos de tecnologías para crear un objeto: la sustractiva y la aditiva. En el primer caso, el material innecesario es extraído por la impresora remedando la labor de un escultor que trabaja sobre un bloque de piedra hasta obtener la escultura final. La tecnología aditiva, en cambio, se caracteriza por sumar capa sobre capa. El mecanismo utilizado con más frecuencia en la planificación operatoria es el aditivo por ser más barato y rápido.

Existen tres grandes mecanismos de funcionamiento de las impresoras aditivas:

- Estereolitografía (SLA): primer método que se creó. Se aplica luz ultravioleta a una cubeta que contiene resina. La luz es controlada por una computadora y va polimerizando la superficie de la resina en la cubeta dando forma al objeto. Por medio de un pistón que desciende, se va exponiendo más resina a la luz y se van creando las distintas capas sucesivas.

- Sinterización selectiva por láser (SSL): sinterizar implica fabricar objetos mediante el prensado de polvos u otras materias que previamente han sido calentadas sin llegar a la fusión. También se aplica una luz ultravioleta, pero en este caso, actúa sobre un polvo, en lugar de hacerlo sobre resina líquida. Se produce una adición por capas solidificando al material.

- Modelado por Deposición Fundida (MDF): en este caso, el material utilizado es un filamento de plástico que pasa por una resistencia en una boquilla que lo calienta por sobre los 200 °C y lo funde para depositarlo sobre una plataforma móvil. Esta tecnología es más sencilla y accesible. Se puede hacer un símil en su forma de funcionar con una manga de repostería en la que el material es expulsado por la presión de las manos del operador y el movimiento de estas genera las formas. En este caso, la impresora 3D tiene un extrusor y motores que van determinando la movilidad de este y de la superficie sobre la que cae el material haciendo que la deposición del material genere la forma deseada en cada capa.

CONSIDERACIONES FINALES

Se ha comparado el efecto que tendrán la planificación y la impresión 3D en medicina, con el advenimiento de la radiología.¹ El uso de esta tecnología encontrará seguramente, con el paso del tiempo, su rol preciso en nuestra práctica. Consideramos de fundamental importancia que el cirujano se involucre en el uso y desarrollo de estas nuevas herramientas que serán de empleo habitual en el quirófano del futuro.

Conflicto de intereses: Los autores no declaran conflictos de intereses.

ORCID de D. Moya: <https://orcid.org/0000-0003-1889-7699>

ORCID de F. Menor Fusaro: <https://orcid.org/0000-0001-9439-8555>

ORCID de S. Valente: <https://orcid.org/0000-0002-1567-5153>

BIBLIOGRAFÍA

1. Skelley NW, Smith MJ, Ma R, Cook JL. Three-dimensional printing technology in orthopaedics. *J Am Acad Orthop Surg* 2019;27(24):918-25. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-18-00746>
2. Green N, Glatt V, Tetsworth K, Wilson LJ, Grant CA. A Practical guide to image processing in the creation of 3D models for orthopedics. *Tech Orthop* 2016;31(3):153-63. <https://doi.org/10.1097/BTO.0000000000000181>
3. Levesque JN, Shah A, Ekhtiari S, Yan JR, Thornley P, Williams DS. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: a scoping review. *EFORT Open Rev* 2020;5(7):430-41. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.5.190024>
4. Tetsworth K, Block S, Glatt V. Putting 3D modelling and 3D printing into practice: virtual surgery and preoperative planning to reconstruct complex post-traumatic skeletal deformities and defects. *SICOT J* 2017;3:16. <https://doi.org/10.1051/sicotj/2016043>
5. Roner S, Bersier P, Fürnstahl P, Vlachopoulos L, Schweizer A, Wieser K. 3D planning and surgical navigation of clavicle osteosynthesis using adaptable patient-specific instruments. *J Orthop Surg Res* 2019;14(1):115. <https://doi.org/10.1186/s13018-019-1151-8>
6. Vlachopoulos L, Schweizer A, Meyer DC, Gerber C, Fürnstahl P. Computer-assisted planning and patient-specific guides for the treatment of midshaft clavicle malunions. *J Shoulder Elbow Surg* 2017;26(8):1367-73. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2017.02.011>
7. Kim HN, Liu XN, Noh KC. Use of a real-size 3D-printed model as a preoperative and intraoperative tool for minimally invasive plating of comminuted midshaft clavicle fractures. *J Orthop Surg Res* 2015;10:91. <https://doi.org/10.1186/s13018-015-0233-5>
8. Menor Fusaro F, Di Felice Ardente P, Pérez Abad M, Yanguas Muns C. Three-dimensional imaging, modeling, and printing in the correction of a complex clavicle malunion. *JSES Int* 2021;5(4):729-33. <https://doi.org/10.1016/j.jseint.2021.04.008>
9. Cheah JW, Goodman JZ, Dang AC. Clavicle fracture malunion treated with an osteotomy guided by a three-dimensional-printed model: A case report. *JBJS Case Connect* 2018;8(4):e98. <https://doi.org/10.2106/JBJS.CC.17.00304>
10. <https://invesalius.github.io/> [Consulta: agosto 2021].
11. <https://horosproject.org/download-horos/> [Consulta: agosto 2021].
12. <https://www.slicer.org/> [Consulta: agosto 2021].
13. <https://www.materialise.com/es/medical/software/mimics-innovation-suite/products-services/mimics> [Consulta: agosto 2021].
14. <https://www.meshmixer.com/> [Consulta: agosto 2021].
15. <https://bitfab.io/blog/meshmixer/> [Consulta: agosto 2021].
16. <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura> [Consulta: agosto 2021].
17. Gross BC, Erkal JL, Lockwood SY, Chen C, Spence DM. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Anal Chem* 2014;86(7): 3240-53. <https://doi.org/10.1021/ac403397r>