BIOMODELADO E IMPRESIÓN 3D EN URUGUAY: UNA NUEVA SUBESPECIALIDAD EN IMAGENOLOGÍA.

Dra. Silvina Zabala-Travers, Dr. Juan Sattler**, Dr. José Perdomo***.*

RESUMEN

En los últimos años han surgido los biomodelos 3D como un nuevo tipo de imagen médica, para apoyo al diagnóstico y tratamiento de pacientes con patologías quirúrgicas complejas. Los biomodelos se generan a partir de imágenes volumétricas de TC o RM a través de un proceso de segmentación que requiere supervisión estricta por parte del médico radiólogo y pueden utilizarse en formato virtual o impreso en 3D en diferentes materiales de acuerdo al uso que se les dará. Esta tecnología se aplica a la mayoría de las especialidades médico-quirúrgicas, para el análisis anatómico y en la planificación de tratamientos que requieren osteotomías precisas, simetría o la construcción de implantes a medida. Tiene utilidad en la comunicación médico-paciente y en la educación y entrenamiento de recursos humanos. En el presente trabajo se describen los requerimientos de imagen y los procedimientos de generación e impresión 3D de biomodelos, se presentan casos clínicos trabajados por el Área de Innovación del Hospital Pereira Rossell para revisar la aplicación en las distintas especialidades y de describe el rol del médico imagenólogo y el flujo de trabajo en esta nueva subespecialidad de la Imagenología.

Palabras clave: Biomodelo 3D, Impresión 3D, Planificación Quirúrgica Virtual, Imagenología.

ABSTRACT

In the last few years, 3D biomodels have found their place as a new kind of medical image, to support the diagnostic and treatment workflow for complex surgical patients. 3D biomodels are generated from CT or MRI volumes through a segmentation process which requires strict radiologist supervision, and they can be navigated as a digital version or 3D printed in different materials according to the intended use. This technology applies to most surgical specialties and is used for anatomical analysis and to plan surgeries that need precise osteotomies, symmetry or custom implant design. It is useful for doctor - patient communication as well as for human resources' education and training. In this article we describe image requirements for 3D biomodeling and the biomodeling and 3D printing process; we present clinical cases from our laboratory at the Innovation Area, Pereira Rossell Hospital, to review their use in different surgical specialties; and we describe the role of radiologists and workflow in this new subspecialty in Radiology.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha surgido un nuevo tipo de imágenes para apoyo al tratamiento de pacientes con patologías quirúrgicas complejas. Los biomodelos 3D son representaciones tridimensionales (3D) de estructuras anatómicas de un paciente, que surgen de los estudios de imagen que se realizan con criterio diagnóstico, cómo la tomografía (TC) o la resonancia magnética (RM) (Figura 1). Pueden considerarse un complemento

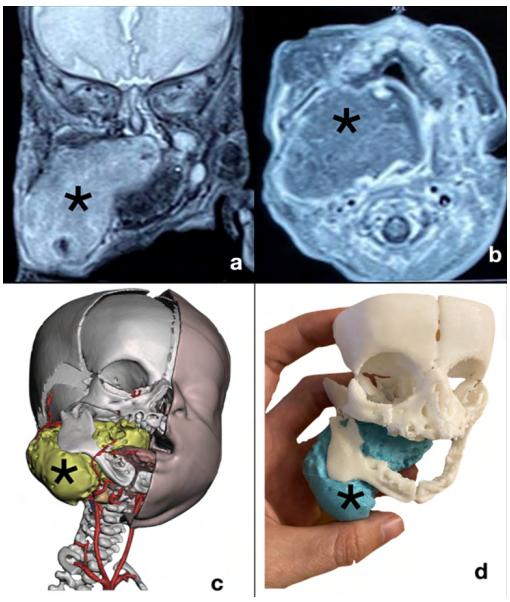


Figura 1.
Ejemplo de Biomodelo 3D
construido para un neonato de 20 días de vida, con diagnóstico prenatal de tumor neuroglial heterotópico gigante en cuello para planificación quirúrgica virtual, trabajo en equipo multidisciplinario con los Departamentos de Neonatología, Cirugía pediátrica, Maxilo-Facial, otorrinlaringología y Anestesia, en el Centro Hospitalario Pereira Rossell. a) RM, secuencia T2, en que se observa una gran masa sólida orofaríngea (*). b) RM de cráneo, corte axial, secuencia T1 con saturación grasa, post administración de Gadolinio, en donde se visualiza el realce principalmente periférico de la masa (*). c) Biomodelo 3D de estructuras anatómicas de cara y cuello: piel, hueso, partes blandas, vasculares y tumor (*) d) Biomodelo impreso en material PLA de las estructuras óseas y el tumor (*).

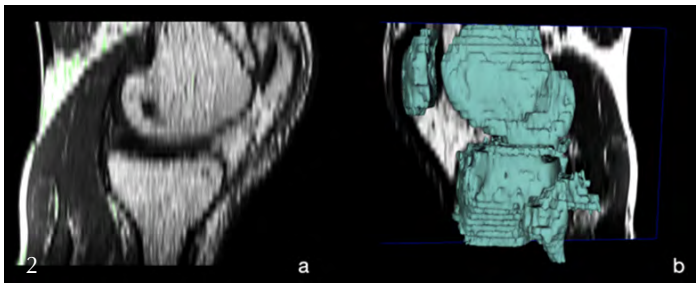
**Médico imagenólogo Pediátrico- Especialista 3D Coordinador - Área Innovación / Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D - Depto Imagenología CHPR Presidente de Comisión Nuevas Tecnologías - SLARP*
***Médico Imagenologo - Especialista 3D. Imagenólogo - Área de innovación / Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D - Departamento de Imagenología - Hospital Pereira Rossell. Imagenólogo - Banco de Seguros del Estado.*
****Médico Imagenólogo - Especialista 3D Imagenólogo - Área de innovación / Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D - Departamento de Imagenología - Hospital Pereira Rossell Imagenólogo - Banco de Seguros del Estado.*

del informe radiológico, una nueva forma de presentar los hallazgos imagenológicos en un lenguaje más familiar al equipo clínico, que facilita la comprensión de una enfermedad y mejora la calidad de la planificación de cirugías complejas. En el presente trabajo se exponen los requerimientos de imagen para lograr biomodelos 3D de calidad, se describe brevemente el procedimiento a través del cual se llega de la imagen DICOM a los biomodelos 3D, se comentan las principales aplicaciones de la tecnología 3D en diferentes especialidades quirúrgicas mientras se presentan casos clínicos trabajados por nuestro grupo, y se explora el rol del médico radiólogo y el flujo de trabajo en esta nueva subespecialidad de la imagenología.

REQUERIMIENTOS DE IMAGEN PARA BIOMODELOS 3D

Los biomodelos 3D se generan a partir de los mismos volúmenes de reconstrucción de imagen DICOM que utilizamos para diagnóstico (1). Para que las imágenes DICOM puedan ser convertidas a biomodelos 3D de buena calidad, sin artefactos, es necesario que se adquieran de forma volumétrica y que las reconstrucciones se realicen con vóxel isométrico o isovóxel (en las que el espesor de corte es igual o menor al espesor del píxel), de corte fino (Figura 2). La mayoría de los tomógrafos en nuestro medio adquieren las imágenes de forma compatible, por lo cual si las mismas son de calidad diagnóstica, serán útiles también para biomodelar. Es importante que las reconstrucciones en el postprocesamiento imagen se realicen con filtro duro y filtro de partes blandas, fundamentalmente este último, que es el más adecuado para las reconstrucciones 3D (Figura 3). Una mención especial ameritan los estudios realizados en pacientes con material de fijación ortopédica o traumatológica metálicos. Paradójicamente, estos pacientes que tanto se benefician de reconstrucciones 3D son los más difíciles de biomodelar por la cantidad de artefactos que se generan en la imagen. Por tanto es recomendable adquirir estos estudios en tomógrafos que cuenten con software para reducción de dichos artefactos (Figura 4).
En resonancia magnética, la situación es distinta, ya que en nuestro medio, las adquisiciones volumétricas no se hacen de rutina. Por lo tanto, se requiere la planificación de aquellos estudios de RM que potencialmente requieran biomodelarse, de modo de adquirir de forma volumétrica al menos una secuencia, de ser posible aquella en la que la estructura de interés o la lesión tengan mejor contraste

Figura 2.
Artefacto en escalera.
a) Vista sagital de secuencia T1 de RM de rodilla adquirido en plano axial, de forma no volumétrica.
b) En celeste se aprecia el biomodelo 3D superpuesto a la imagen DICOM, en el que se aprecia el "artefacto en escalera", causado por un espesor de corte mayor al tamaño de píxel.



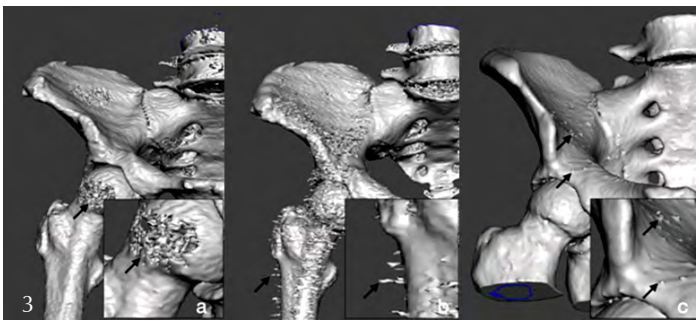


Figura 3
Artefactos de porosidad y espículas. Biomodelo 3D óseo de pelvis *en el que se muestra la diferencia de calidad de biomodelo cuando la misma se realiza a partir del volúmen de reconstrucción con filtro duro o filtro de hueso a) y b) y a partir del volúmen reconstruido con filtro de partes blandas.* ***a)*** *artefacto de porosidad.* ***b)*** *artefactos espiculados.* ***c)*** *escasos artefactos espiculados.*

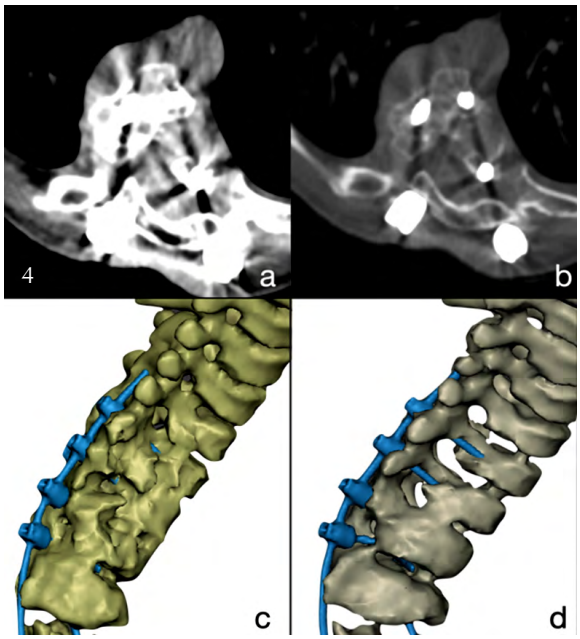
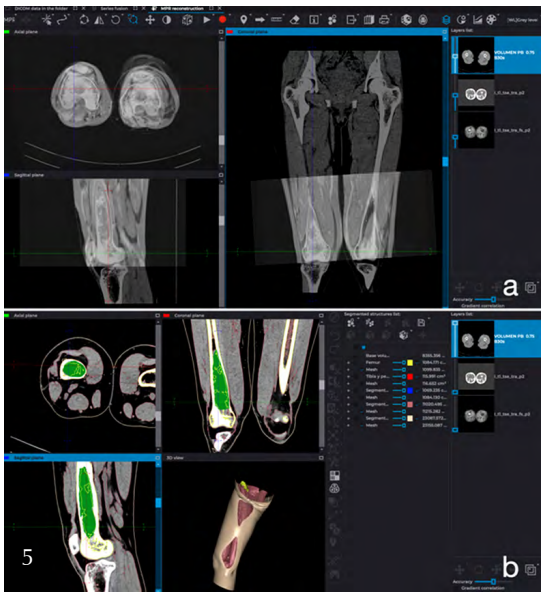


Figura 4
Artefactos por metal
a) y b) muestran cortes axiales de una TC de columna en una paciente pediátrica del Departamento de Ortopedia Infantil del Centro Hospitalario Pereira Rossell con escoliosis severa, que presenta material de fijación metálica por una intervención quirúrgica previa. Se muestran imágenes de la reconstrucción sin (a) y con (b) software de remoción de artefacto por metal. c) y d) muestran el biomodelo 3D de columna realizado para planificación y simulación quirúrgica, obtenido desde las imágenes DICOM (a) y (b) respectivamente. El software de remoción de artefactos metálicos mejora significativamente la calidad diagnóstica de las imágenes además de permitir el biomodelado 3D con alta definición anatómica y en menor tiempo.

con los tejidos adyacentes. La secuencia T2 o el T1 con saturación grasa tras la administración de Gadolinio son secuencias útiles para la mayoría de las lesiones oncológicas. Dado que la planificación específica de la RM se considera en general una limitante para el uso de la información de RM en biomodelos, centros en donde se utilizan biomodelos con mayor frecuencia han publicado protocolos de adquisición para adultos y niños optimizados a diferentes situaciones clínicas para lograr imágenes de calidad diagnóstica y buena calidad para biomodelar (2,3).
Planificamos las adquisiciones para lograr una máxima reducción de artefactos técnicos, por movimiento o por entrada de flujo de contraste; ajustamos parámetros para reducción de artefactos de endurecimiento del haz y lograr el menor ruido posible en la imagen, incluyendo toda el área de interés en la adquisición. Como regla general, las mismas condiciones que aplican a la conducción de un estudio para que tenga valor diagnóstico, aplican para que el mismo sea de calidad acorde para el biomodelado 3D.

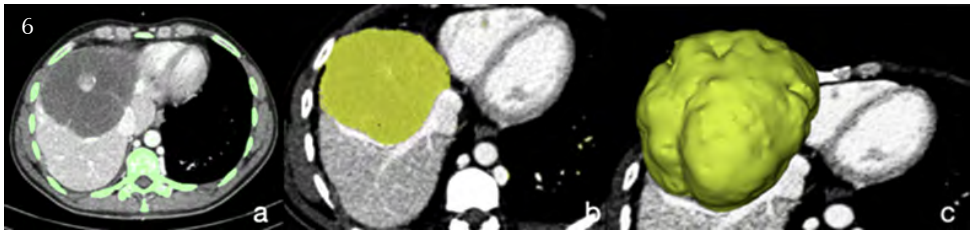
Figura 5 - Registro TC/RM y proceso de segmentación
a) *Proceso de registro de TC y secuencias T1 y T1 con Gadolinio en el que de forma manual se realiza el ajuste de estructuras, utilizando las estructuras óseas como referencia.* ***b)*** *Proceso de segmentación de estructuras óseas, piel y músculo desde la TC y lesión tumoral intraósea desde la secuencia T1 de RM. Software Inobitec v 2.5.*



GENERACIÓN DE BIOMODELOS 3D

El mismo volumen de reconstrucción DICOM que se usa para diagnóstico se carga en un software específico para biomodelado 3D. En nuestro laboratorio utilizamos software de descarga gratuita (Ivesalius v3.1 y Slicer 4.1) (4,5). A partir de un proceso llamado "segmentación", en el que se etiquetan los píxeles correspondientes a cada estructura anatómica, se va generando el biomodelo 3D (Figura 5) (6). Dependiendo de la estructura a biomodelar, el proceso puede ser más o menos automático, aunque siempre se requiere de supervisión humana y corrección manual, en particular de los límites entre estructuras, y mayormente cuando se trata de enfermedades oncológicas o malformaciones complejas. Existen softwares comerciales que permiten superponer imágenes de distintos estudios (TC, RM, PET) en la etapa de segmentación, proceso llamado "registro de imágenes", para obtener biomodelos que contengan información proveniente de distintos estudios (Figura 5). Si bien se promociona por la industria como semi-automático, este proceso conlleva una gran etapa de ajuste manual y verificación de la correcta superposición de estructuras y eventual deformación de imagen ocasionada por el ajuste automático, por lo que es insustituible la supervisión por médico imagenólogo. Además, se deben tener en cuenta las limitaciones del biomodelo por imprecisiones derivadas de este proceso, principalmente cuando se trata de lesiones en partes blandas, por deformación diferencial de tejidos entre estudios. Un paso fundamental en la etapa de segmentación es el control de calidad, en el que se verifica que los límites de las estructuras segmentadas se correspondan exactamente con los límites en las imágenes DICOM, esto asegura la precisión del biomodelo (Figura 6). El resultado del postprocesamiento de imágenes en estos software de segmentación o biomodelado son archivos en formato .STL ("standard triangle language"), o mallas de triángulos, que luego se exportan a programas de visualización y edición de biomodelos 3D (Figura 7).

Figura 6 - Control de Calidad
a) *Corte axial en TC que muestra una metástasis hepática.* ***b*** *Proceso de segmentación de la masa hepática.* ***c)*** *Superposición del biomodelo 3D de la masa y las imágenes DICOM para control de calidad.*



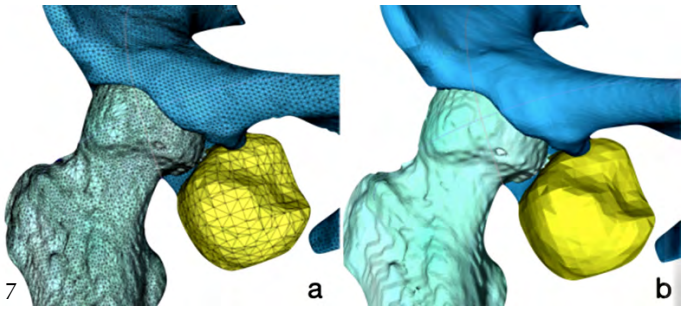


Figura 7 - Formato STL
En ***(a)*** *puede visualizarse el formato en malla de triángulos con el que se corresponden los archivos en 3D que luego visualizamos como se observa en* ***(b).***

Los biomodelos 3D se utilizan en formato virtual y en formato real, tangible, impresos en 3D.

Biomodelos 3D virtuales

Los biomodelos 3D virtuales se visualizan en programas especiales. Todos los ejemplos de biomodelos 3D que se presentan en este artículo fueron creados por nuestro laboratorio utilizando Autodesk® Meshmixer™ (v3.5) La navegación de los biomodelos 3D permite girarlos 360º, permitiendo así la comprensión de relaciones anatómicas desde todos los ángulos (Figura 8).

Las distintas estructuras que lo componen pueden visualizarse u ocultarse selectivamente para el análisis exhaustivo de las relaciones anatómicas entre sí y se pueden colorear para facilitar su identificación y comprensión. Existe también un modo de visualización "transparente" que facilita especialmente el estudio de relaciones anatómicas vasculares y de masas tumorales en el interior de los órganos (Figura 9). Los archivos .STL pueden ser navegados por los propios clínicos para el análisis anatómico utilizando software de visualización 3D (Figura 10).

Otro formato de entrega que se utiliza frecuentemente es el de fotos explicativas y videos .mp4 (Figura 11). También es posible la aplicación de realidad virtual y aumentada para el estudio biomodelos 3D utilizando una experiencia más inmersiva.

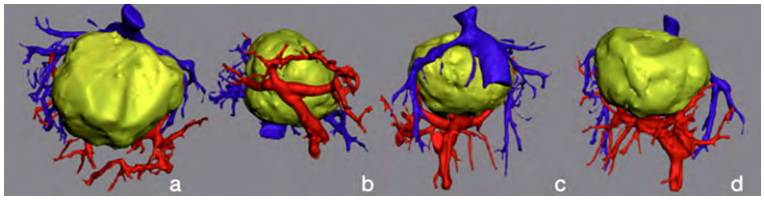


Figura 8 - Visualización en 360º
Visualización de biomodelo 3D virtual de metástasis hepática y vasos hepáticos de la Figura 6. Se muestran imágenes desde distintos ángulos de las relaciones de la masa hepática con la vascularización del sistema porta (en rojo) y VCI-suprahepáticas (azul):
***a)** vista superior, **b)** vista inferior, **c)** vista posterior, d) vista anterior.*

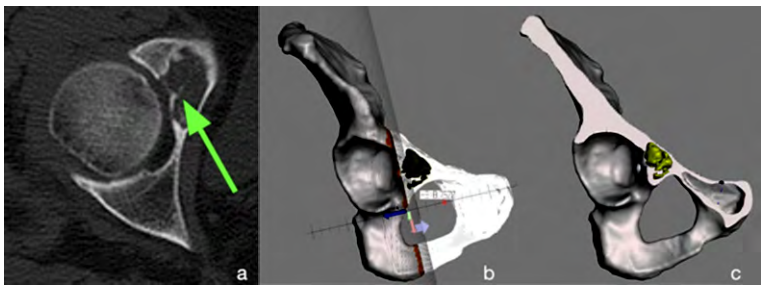


Figura 9 - Transparencia
***a)** Corte axial de TC en el que se observa un condrosarcoma coxal (flecha) en una paciente de 70 años intervenida por la Unidad de Patología Oncológica Músculo-Esquelética (UPOME) de la UdelaR.*
***b)** Biomodelo 3D del hueso coxal y lesión ósea. Visualización en modo transparente que permite evaluar las relaciones con la lesión tumoral en su interior.*
***c)** Herramienta de corte en que permite trazar diferentes planos de corte para analizar relaciones, topografía y planificar la futura cirugía.*

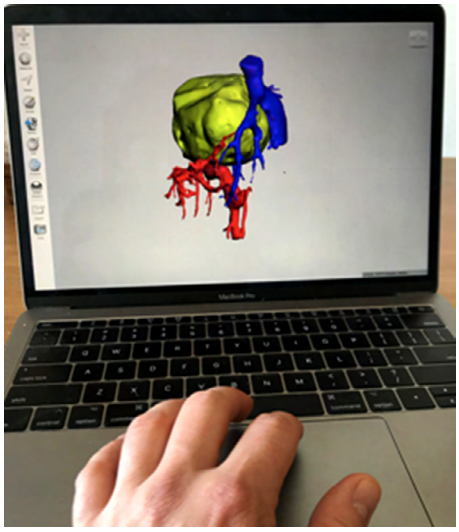


***Figura 10 - Navegación de los biomodelos 3D**. Visualización y procesamiento de archivos .STL en el programa Meshmixer en ordenador portátil.*

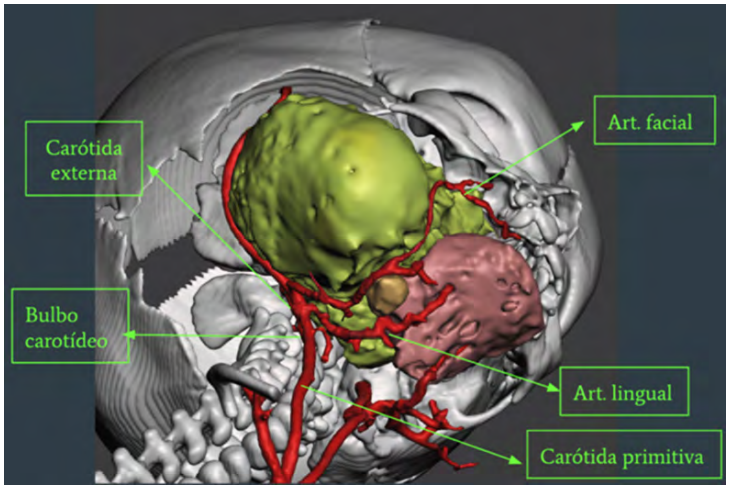


Figura 11
Ejemplo de material de entrega en formato pdf.
Relaciones vasculares arteriales del tumor neuroglial heterotópico gigante del paciente presentado en la Figura 1.

Impresión 3D

La impresión 3D consiste en materializar el biomodelo 3D virtual, obteniendo una réplica exacta en tamaño real de la región anatómica en estudio (Figura 12).

Para ello existe una amplia gama de materiales con diferentes propiedades mecánicas y químicas así como distintos tipos de tecnologías de impresión (7). La elección del tipo de material se basa fundamentalmente en su posterior uso. De forma muy resumida, las diferentes categorías podrían agruparse de la siguiente manera: similares al plástico (polímeros termoplásticos como el ABS, ácido poliláctico o PLA, Nylon), sirven mayormente para imprimir piezas que se usan para estudio anatómico y simulación (Figura 1d). Dentro de esta categoría también existen materiales flexibles (como el poliuretano termoplástico, TPU) que son especialmente útiles para imprimir órganos con algún grado de elasticidad para simulación de procedimientos (ej. vía aérea para intubación orotraqueal, endoscopía, simulación de sutura) (Figura 13).

Existen materiales más duros y resistentes, como las resinas, que se utilizan para biomodelos anatómicos, en odontología o para imprimir guías quirúrgicas (Figura 14). Además, la tecnología 3D ha puesto en auge el diseño e impresión de ortesis y prótesis implantables a medida, por ejemplo de articulaciones (cadera, rodilla, codo) o para reconstrucciones óseas (cráneo, caja torácica), para lo que se utilizan materiales implantables, biocompatibles, como el titanio, aluminio y fibras de carbono (8). Existen también materiales de impresión 3D implantables biocompatibles, reabsorbibles, como la policaprolactona (PCL) que se utiliza en la impresión de stents en cirugía cardiovascular, prótesis para tratamiento de debilidades de la vía aérea como la bronquiomalacia y en el tratamiento de defectos óseos, entre otros (9). Por otro lado, la bioimpresión celular en 3D y el uso de las biotintas ya está en etapa de prueba y el desarrollo de órganos vivos funcionales está cada vez más lejos de la utopía (10). Por último, la impresión 4D, define aquellas estructuras que luego de impresas utilizando tecnologías de impresión 3D pueden modificar su forma o sus propiedades mecánicas o químicas de una forma prediseñada, cuando son expuestas a estímulos externos (temperatura, pH, campos magnéticos). También se considera impresión 4D cuando se imprime en 3D con materiales enriquecidos (por ejemplo con sensores). Esto ha permitido la impresión de dispositivos implantables "inteligentes", capaces de adaptarse a una forma determinada o de actuar como sensores y enviar señales a ser captadas por equipos externos luego de ser implantadas en el cuerpo humano (11). Ejemplos de ello son prótesis articulares con sensores que emiten bioinformación o implantes con células madre óseas que al exponerse al entorno biológico se diferencian y remodelan para cubrir un defecto óseo (12).

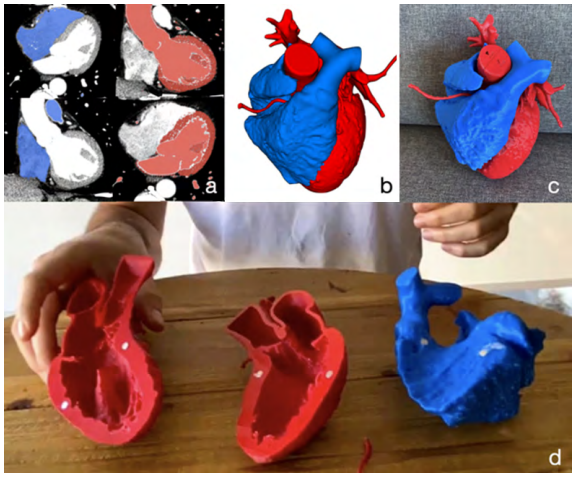


Figura 12 - Biomodelado e impresión 3D de modelo cardíaco.
Biomodelo 3D cardíaco impreso con fines educativos. a) Proceso de segmentación de cavidades y luz del circuito circulatorio, b) Biomodelo 3D cardíaco virtual con circuito derecho representado en azul y circuito izquierdo en rojo, c) réplica exacta impresa en 3D en tamaño real, en material PLA, compuesto por varias partes ensambladas; el circuito derecho en PLA azul y el izquierdo en PLA rojo, d) biomodelo cardíaco, piezas separadas, con imanes en sus paredes para ensamblaje, como se muestra en (c).

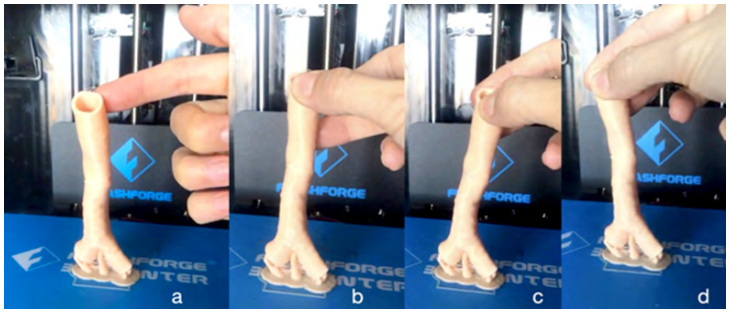


Figura 13 - Ejemplo de impresión en material flexible.
Biomodelo de traquea y bronquios fuente, impreso en material flexible (TPU) para simulación de procedimientos de endoscopia.

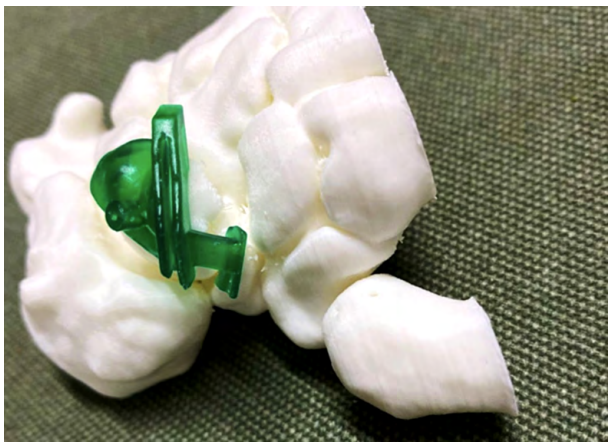


Figura 14 - Ejemplo de impresión en resina. *Guías de corte (verde) diseñada para cirugía por pseudoartrosis de escafoides trabajada en conjunto con el Departamento de Cirugía Plástica del Hospital de Clínicas. En blanco biomodelo 3D de puño para planificación quirúrgica y simulación de procedimiento.*

APLICACIONES

Los biomodelos 3D se aplican actualmente al diagnóstico, tratamiento y entrenamiento de recursos humanos en casos quirúrgicos complejos. Algunas de las especialidades en que tienen mayor aplicación son traumatología y ortopedia, cirugía plástica, cirugía máxilo-facial, cirugía pediátrica, general, cirugía vascular y cardíaca, cirugía de tórax y urología.

Biomodelos 3D en diagnóstico

Los biomodelos 3D pueden considerarse un nuevo formato complementario al informe radiológico de un estudio de imagen diagnóstico para un paciente complejo. En primer lugar, presentan los hallazgos de imagen en un lenguaje más familiar para quien no está entrenado en la interpretación de imágenes en 2D de TC o RM, permitiendo a los clínicos la asimilación de información en menor tiempo que con el análisis de imágenes DICOM. En segundo lugar, agregan información útil a la planificación de tratamiento. Cómo médicos radiólogos, interpretamos los hallazgos de imagen y elegimos qué incluir en nuestro informe de modo tal de destacar la información útil para la comprensión de una patología, así como elementos que puedan ser importantes en su resolución. Sin embargo, un estudio de imagen brinda mucha más información que no sería viable informar por escrito y que es difícil de interpretar utilizando un modo de visualización en 2D para los cuales el formato 3D es específicamente útil. Un ejemplo de ello podría ser la disposición de arterias y venas en torno a una estructura, al detalle de mediano vaso.

Se han publicado numerosas ventajas de trabajar con tecnologías 3D. Los biomodelos y la planificación quirúrgica virtual permiten reducir las principales causas de complicaciones quirúrgicas y anestésicas que se describen para cirugías complejas: tiempos quirúrgicos prolongados, tiempos anestésicos prolongados y las consecuentes dosis de medicación y altas tasas de sangrado (13). Los equipos quirúrgicos que utilizan la tecnología 3D en el tratamiento de sus pacientes refieren mayor seguridad en el conocimiento de la patología del paciente en comparación con la valoración con las técnicas de imagen convencionales (14). El análisis anatómico exhaustivo permite anticipar y prevenir potenciales complicaciones, en particular la tasa de lesiones accidentales, y reducir el volúmen de hemorragia intraoperatoria (13, 15, 16).

Dado que el trabajo con biomodelos 3D permite cálculos volumétricos, es posible hacer diagnóstico de volumen y calcular volumetrías comparativas, por ejemplo en lesiones pre y post quimioterapia, que se asocian con una predicción de respuesta a tratamientos (Figura 15) (17). También es posible realizar simulaciones para calcular volúmen de órgano residual post-quirúrgico, cómo por ejemplo en cirugía de resección de metástasis hepáticas, decidiendo si un paciente está o no en oportunidad quirúrgica (Figura 15)(18).

Por último, los biomodelos virtuales y los impresos en 3D mejoran la comunicación entre clínicos, pacientes y sus familiares, lo que posibilita una mejor comprensión de la enfermedad, los riesgos de su tratamiento y un empoderamiento a la hora de toma de decisiones (19).

Biomodelos 3D en tratamiento

Los biomodelos 3D se utilizan para la planificación quirúrgica virtual de pacientes complejos, creando así una instancia de planificación inexistente previa a la aparición de esta tecnología. Programas de biomodelado y diseño en 3D permiten simular márgenes oncológicos de una lesión y realizar cortes y sustracción de sectores de un biomodelo, para simular, por ejemplo, resecciones oncológicas (Figura 16). De esta forma, se pueden probar distintas estrategias quirúrgicas, hasta llegar a la que tenga mayores beneficios y menores riesgos para el paciente.

Figura 15 - Cálculo de volumetría comparativa y volúmen residual
a) *Biomodelo 3D Sarcoma de Ewing de fémur izquierdo. En transparente se presenta la lesión post quimioterapia y el valor de volumen y superficie (flecha gris). En rojo se presenta la lesión prequimioterapia con sus correspondientes valores (flecha roja).*
b) y c) *biomodelo hepático con lesión por metástasis. Cirugía virtual y cálculo estimativo de volumetría residual post resección lesional.*

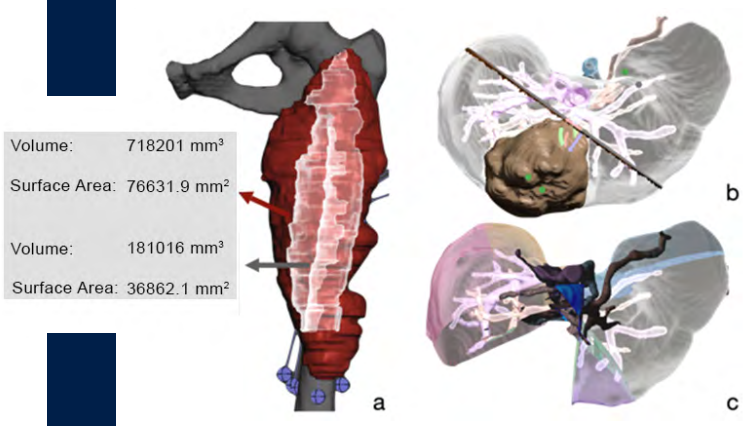
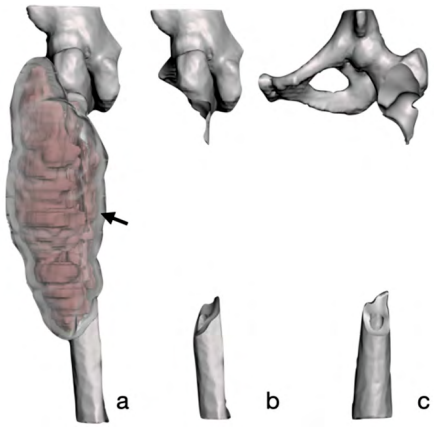


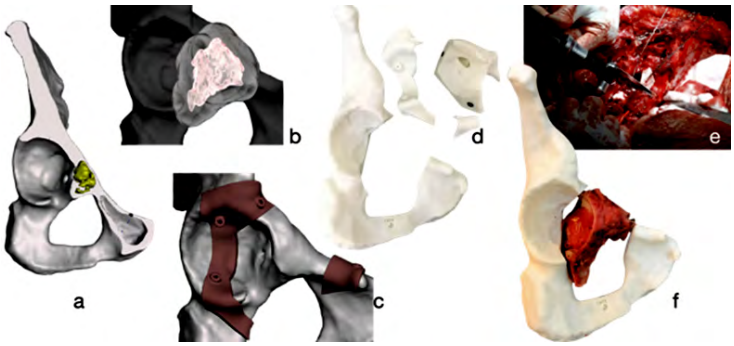
Figura 16 - Simulación de márgen oncológico y cirugía virtual
Se presenta una paciente de 19 años con un Sarcoma de Ewing.
a) *Biomodelo 3D óseo y tumoral: lesión prequimioterapia (rosado) y simulación del márgen oncológico sano de 10 mm como un halo gris alrededor (flecha).*
b) y c) *muestran la simulación resección de la lesión más el márgen, de perfil y de frente, respectivamente, para decidir la estrategia quirúrgica.*



Un paso más en la planificación quirúrgica virtual es el diseño de guías quirúrgicas de corte, las cuales se usan principalmente en traumatología y ortopedia, cirugías máxilo-faciales y cirugía plástica. Estas herramientas personalizadas se diseñan específicamente para ser usadas durante la cirugía de un paciente y permiten reproducir paso a paso lo planificado virtualmente. Son moldes que se adaptan únicamente a la anatomía ósea del paciente para el cual fueron diseñadas, que tienen ranuras del ancho de la sierra quirúrgica, que marcan al cirujano la localización y orientación exacta de la osteotomía, de modo de reproducir de forma precisa lo planificado en la etapa virtual y asegurar la resección del tumor con márgenes sanos (figuras 17). Esta estrategia permite muchas veces conservar articulaciones o evitar amputaciones que no serían posibles de forma segura sin el uso de estas guías. Como resultado del uso de planificación y guías las cirugías oncológicas son más precisas y más seguras (20).

En algunos casos los biomodelos 3D se imprimen, creando una réplica de la anatomía y de la enfermedad del paciente para simulación pre-quirúrgica del procedimiento. Permiten estudiar y planificar la táctica quirúrgica, practicar procedimientos, practicar la colocación de guías, diseñar osteotomías y la localización de fijaciones y tornillos, así como preparar el material de osteosíntesis, con la elección de los materiales a medida (Figura 18 y 19). La planificación pre-quirúrgica virtual y la simulación con modelos anatómicos impresos en 3D permiten la elección, ensayo y cambio en estrategias quirúrgicas en un tiempo preoperatorio, reduciendo el tiempo en block quirúrgico y el tiempo anestésico, y así la tasa de complicaciones vinculadas a ello (16,21,22,23). Se ha publicado una reducción de tiempos quirúrgicos entre 23 y 62 minutos

Figura 17 - Planificación quirúrgica virtual y diseño de guías quirúrgicas para cirugía de resección de condrosarcoma acetabular
Planificación quirúrgica virtual y diseño de guías quirúrgicas para la paciente presentada en la Figura 9 intervenida por un condrosarcoma acetabular. ***a)*** *Biomodelo 3D virtual de hueso coxal y lesión.* ***b)*** *Simulación de márgen oncológico sano de 10 mm.* ***c)*** *Diseño de guías de corte paciente específica.* ***d)*** *Impresión 3D en material PLA de biomodelo óseo coxal, fragmento de osteotomía, y guías de corte.* ***e)*** *Imagen del procedimiento quirúrgico: osteotomía coxal con sierra oscilante guiada por guía quirúrgica impresa en 3D.* ***f)*** *Comparación del fragmento de osteotomía con el hueso coxal impreso a escala real para doble verificación de precisión del procedimiento. La planificación virtual y el uso de guías permitieron conservar la articulación.*



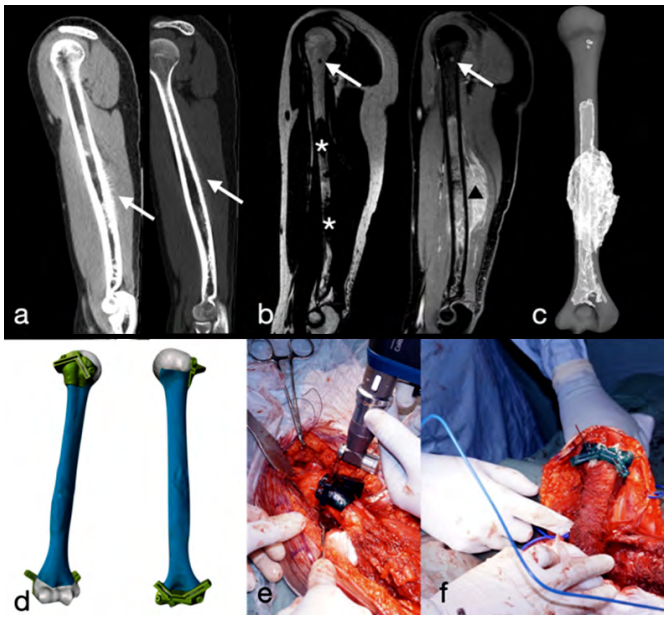


Figura 18 - Planificación quirúrgica virtual y diseño de guías quirúrgicas en Sarcoma de Ewing. *Paciente de 14 años con Sarcoma de Ewing humeral, trabajada en equipo con UPOME.* ***a)*** *Corte sagital de TC en ventanas de partes blandas y ventana ósea en la que se observa una lesión diafisaria humeral con reacción perióstica en sol naciente (flechas).* ***b)*** *Cortes en sagital de RM T1 y T1 con Gd en donde se observa una lesión hipointensa en T1 que realza con contraste (*), con componente de partes blandas (triángulo) y una pequeña skip metástasis en la metáfisis proximal (flechas).* ***c)*** *Biomodelo 3D del húmero y la lesión tumoral con el componente de partes blandas, diagnosticada como Sarcoma de Ewing por anatomía patológica.* ***d)*** *Diseño de guías de corte para osteotomía proximal y distal.* ***e)*** *Procedimiento quirúrgico en donde se muestra en uso intraoperatorio de las guías impresas en resina. Se realiza procedimiento de congelamiento del fragmento de osteotomía. La planificación con guías quirúrgicas permitió conservar ambas articulaciones en una paciente en edad pediátrica.*

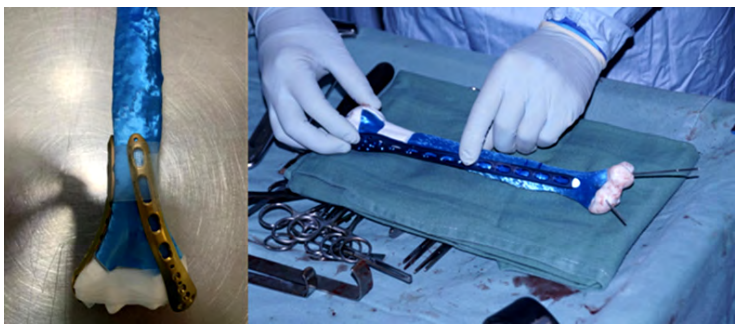


Figura 19
Preparación de material quirúrgico. *Húmero impreso en 3D, réplica exacta del hueso de la paciente presentada en la Figura 18. Se muestra el procedimiento en el cual se utiliza el biomodelo para la elección del material de osteosíntesis a medida y el moldeado previo y durante la cirugía, acortando el tiempo anestésico.*

para pacientes en los que se usó planificación virtual con guías y biomodelos anatómicos, respectivamente (23). El mismo estudio describe un análisis de costos para centros de salud de Estados Unidos que utilizan tecnologías 3D con distintos costos de funcionamiento de block. Dicho análisis describe una reducción de costo por cirugía en todos los centros estudiados. Como ejemplo, para un costo promedio de funcionamiento de block de 65USD/min, el ahorro por caso quirúrgico se describe entre 1918 y 5172 USD, con el uso de planificación virtual y diseño de guías, y modelos anatómicos, respectivamente (23). El ahorro de tiempos quirúrgicos abre también la posibilidad de mayor número de cirugías al mes permitiendo tratar un mayor número de pacientes.

Por último, se describe una menor exposición del equipo quirúrgico a rayos x en cirugías de pacientes en los que se utiliza la planificación virtual, derivada de una mayor tasa de éxito en la reconstrucción de fracturas complejas y posicionamiento inicial de material de fijación que lleva a una menor necesidad de imágenes intraoperatorias (15). Finalmente, es posible diseñar e imprimir con tecnologías 3D prótesis en materiales implantables biocompatibles, a medida del paciente, que se utilizan en cirugías de recambio articular, reparación de defectos óseos, o miembros protésicos. Las prótesis paciente-específicas reducen complicaciones frecuentes derivadas del uso de prótesis de tamaño estándar, aceleran el proceso de recuperación, mejoran la estabilidad inicial y a largo plazo de los implantes así como los resultados estéticos (24,25)

Aplicaciones en Cirugía Cardíaca

En cirugía cardíaca, la tecnología 3D se utiliza principalmente en cardiopatías congénitas, valvulopatías y patología de grandes vasos, en las que permiten una planificación quirúrgica avanzada y simulación de los procedimientos en el biomodelo impreso en 3D (Figura 20). Su uso se ha asociado a un mejores resultados quirúrgicos, a una minimización de los riesgos perioperatorios, disminución de los tiempos quirúrgicos, disminución de las complicaciones peri-quirúrgicas y al desarrollo de nuevas técnicas de tratamiento mínimamente invasivas (26,27)

Aplicaciones en Cirugía de Tórax

En oncología, la volumetría de los nódulos pulmonares se utiliza desde hace tiempo como biomarcador de oportunidad quirúrgica, a esto se suma la posibilidad de biomodelado 3D para el estudio de las relaciones del nódulo o lesiones tumorales en localizaciones complejas con los vasos sanguíneos y bronquios, que se ha asociado con subsegmentectomias, segmentectomías y lobectomías más rápidas, con menor tasa de sangrado y menor tiempo intrahospitalario de los pacientes (Figura 21) (28,29,30). Se describe con éxito en una serie de pacientes el uso de impresión 3D combinado con realidad aumentada para uso intrablock (30). Para resecciones óseas en la caja torácica se puede planificar primero de forma virtual, diseñando guías de corte para las osteotomías y utilizar la impresión 3D para la guía de confección de implantes óseos autólogos o heterólogos en la reconstrucción. (Figura 22) (28,29). En esta región también es muy útil el diseño de



Figura 20
Biomodelos en cirugía cardíaca
Lactante con cardiopatía congénita: doble tracto de salida del ventrículo derecho (VD) y comunicación interventricular.
a) *Biomodelo 3D virtual de cavidades y circuito sanguíneo en donde se visualiza la arteria Aorta (*) y la Arteria pulmonar (**) en su emergencia del VD.*
b) *Impresión 3D del corazón en partes ensamblables con imán, en material flexible (TPU). El biomodelo impreso se utilizó para el análisis anatómico del defecto cardíaco, simulación del procedimiento y preparación materiales a medida que luego se esterilizaron para ser utilizados en block quirúrgico, con el consiguiente ahorro en tiempo anestésico.*



Figura 21
Biomodelo 3D para planificación quirúrgica
En verde se observa neurofibroma malignizado en opérculo torácico en una paciente pediátrica. Se biomodelaron también estructuras óseas, vasculares, corazón, pulmones y vascularización pulmonar.

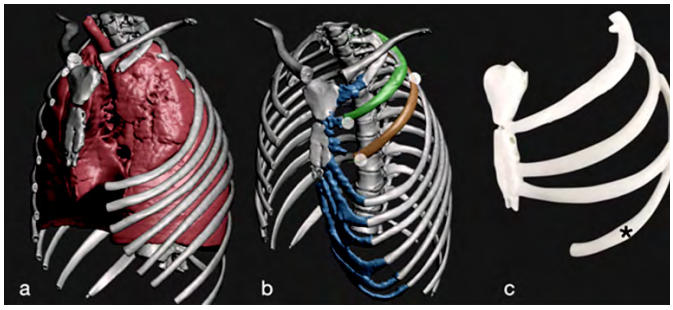


Figura 22
Biomodelos en cirugía de tórax
Paciente pediátrica de edad 12 años, con gran defecto óseo parietal izquierdo por ausencia de arcos costales debido a resección de un sarcoma en la infancia.
a) *Biomodelo 3D óseo y pulmonar donde se aprecia el defecto óseo.* ***b)*** *Planificación quirúrgica virtual de la corrección utilizando la técnica "imagen espejo" de los arcos contralaterales sanos y diseño de novo de una costilla accesoria (*) para cubrir el defecto por la deformación de su parrilla costal.*
c) *Diseño e impresión 3D de los arcos costales diseñados para elección a medida del material óseo heterólogo a implantar.*

implantes a medida metálicos o de fibra de carbono que por su diseño reproducen las características de elasticidad de la caja torácica (30). El uso de materiales reabsorbible como la policaprolactona (PCL), ha permitido también el desarrollo de implantes reabsorbibles para tratar broncomalacias (7). La volumetría pulmonar utilizando herramientas de biomodelado como Slicer ha tenido especial importancia durante la pandemia COVID-19 en la que se utilizó para cuantificar infiltración y atelectasia para determinar coeficientes asociados con el pronóstico de los pacientes (32).

Aplicaciones en Traumatología y Ortopedia

En cirugía ortopédica, el uso de biomodelos 3D se ha utilizado con éxito en cirugías de columna, en las que se reportan mejoras en la visualización y comunicación entre miembros del equipo quirúrgico, así como mejores resultados en la colocación de tornillos y fijadores (33,34). Los biomodelos impresos en materiales como PLA, a escala real, permiten simular reducciones y preparar el material de fijación previo a la cirugía (Figura 23 y 24). Ya fueron nombradas las ventajas de contar con esta tecnología en cirugías de preservación de articulaciones y cirugía de preservación de miembros en oncología ortopédica (20). También son destacables los resultados en cirugía reparadora y reconstructiva, por lesiones traumáticas y fracturas complejas, en las que se reportan mejores resultados estéticos y funcionales, con cirugías menos invasivas, en menor tiempo y con menor tasa de sangrado, en comparación a cirugías convencionales sin uso de tecnología 3D (35,36). La técnica "espejo" es muy utilizada para reparación de patologías óseas como fracturas complejas acetabulares, claviculares, de tobillo, escafoides, pilón. Dicha técnica utiliza la reconstrucción 3D de la imagen espejo del mismo hueso sano contralateral, que se modela virtualmente y luego se imprime en 3D a escala real para premoldeado de placas de fijación (36). Si bien en algunos casos implica irradiar al paciente con una tomografía del lado sano, en pacientes con fracturas complejas, se contrarresta con un menor tiempo de fluoroscopia en block, lo cual sumado a los mejores resultados quirúrgicos inclinan la balanza costo/beneficio hacia este último (36). La planificación virtual se utiliza también en la reparación de miembros en varo o valgo y en pseudoartrosis por fracturas, con excelentes resultados quirúrgicos, reducción de exposición a rayos x y menor tasa de hemorragia (37,38). Por último, tiene especial utilidad en la planificación prequirúrgica de pacientes con displasia de cadera, en los que se planifican las osetotomías y se diseñan guías para restablecer la funcionalidad de la articulación (39)

Aplicaciones en Plástica y Máxilo-facial

Ambas especialidades trabajan con patologías óseas en las que son necesarias osteotomías precisas, modelado óseo y moldeado de placas. La tecnología 3D aporta significativamente en la planificación prequirúrgica, la cirugía virtual y precisión de osteotomías a través del diseño e impresión 3D de guías de corte y modelos óseos a escala real para el

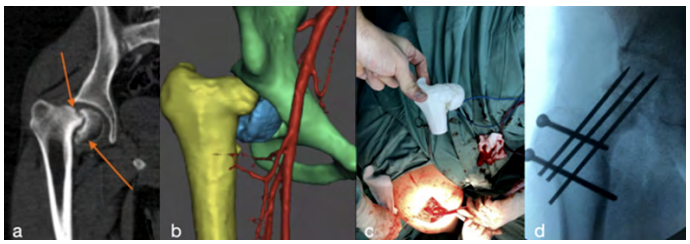


Figura 23
Biomodelos en traumatología y ortopedia
Simulación prequirúrgica de corrección de epifisiolistesis en un paciente pediátrico del Departamento de Traumatología y Ortopedia Infantil del Centro Hospitalario Pereira Rossell. a) Corte coronal de TC en el que se observa el desplazamiento de la epífisis femoral derecha (flechas) b) Biomodelo virtual óseo y de estructuras vasculares para planificación quirúrgica. c) Imagen del intraoperatorio en el que se utilizó el biomodelo óseo impreso en PLA a escala real del defecto como referencia para la reparación de la epifisiolistesis. d) Control radiológico post operatorio en el que se observa la reparación exitosa del defecto.

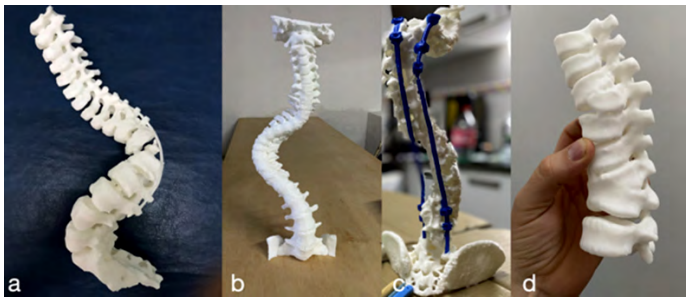


Figura 24
Biomodelos en cirugía de columna
Diferentes tipos de escoliosis y malformaciones vertebrales de pacientes con patologías complejas, impresas en material PLA, utilizadas en la planificación quirúrgica, elección del material y formación de residentes en del Departamento de Traumatología y Ortopedia del Centro Hospitalario Pereira Rossell.

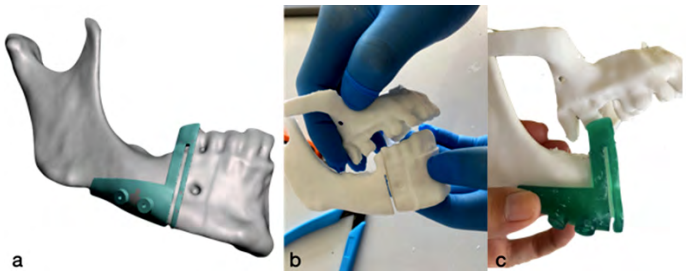


Figura 25
Biomodelos en Cirugía Plástica y Máxilo-Facial
Paciente con carcinoma espinocelular en en cara con invasión ósea en maxilar inferior. a) Planificación virtual para resección del hueso afectado con margen oncológico sano. b) Impresión 3D en PLA de la región ósea y el fragmento de osteotomía. c) guía quirúrgica impresa en resina.

premoldeado de placas (Figura 25) (40,41,42). Las planificación con la técnica de "imagen en espejo" tiene especial aplicación en estas especialidades, ya que implican con frecuencia la reconstrucción ósea en áreas anatómicas que requieren de la simetría (Figura 26). El uso de tecnologías 3D se ha asociado con mejores resultados en cuanto a la simetría así como a menores tiempos quirúrgicos (40,41,42). El diseño de férulas y prótesis a medida para pacientes con defectos complejos como el paladar hendido o malformaciones de pabellón auricular o nariz es otro gran campo de aplicación de la tecnología 3D. Por último, el diseño e impresión de implantes a medida de defectos óseos máxilo-faciales, en materiales metálicos como el titanio, tiene gran utilidad en esta región. (40)

Aplicaciones en Urología

Los biomodelos virtuales e impresos en 3D son útiles para el análisis anatómico detallado en cirugías complejas. Permiten planificación virtual de nefrectomías parciales y el estudio de variantes anatómicas vasculares para evitar lesiones accidentales y reducir así las tasas de hemorragia. Se ha utilizado biomodelado e impresión 3D en nefrectomías oncológicas, en simulación de nefrolitotomías percutáneas, en el estudio anatómico y comparación de vascularización de donante y receptor en casos de trasplante renal y para crear simuladores de entrenamiento de cirugía laparoscópica y robótica en diferentes regiones anatómicas (Figura 27) (43).

Aplicaciones en Neurocirugía

Los biomodelos se aplican principalmente al estudio anatómico de patologías tumorales y vasculares de lesiones con relaciones complejas y en localizaciones vinculadas sobre todo a base de cráneo. Se aplica a patologías como la craneosinostosis, ventriculostomías y ventriculostomías. También a la reconstrucción ósea de defectos complejos en cráneo con impresión de implantes a medida. Cumple un rol fundamental en el desarrollo de simuladores para entrenamiento de profesionales (Figura 28)(44).

Aplicaciones en Cirugía Pediátrica

En cirugía pediátrica general los biomodelos se utilizan para el estudio anatómico de patologías oncológicas complejas, agregan información útil a la planificación del tratamiento y colaboran en la decisión de estrategias quirúrgicas (45) Todas las aplicaciones nombradas en las distintas áreas descritas anteriormente aplican también a la cirugía en niños. (Figura 29).

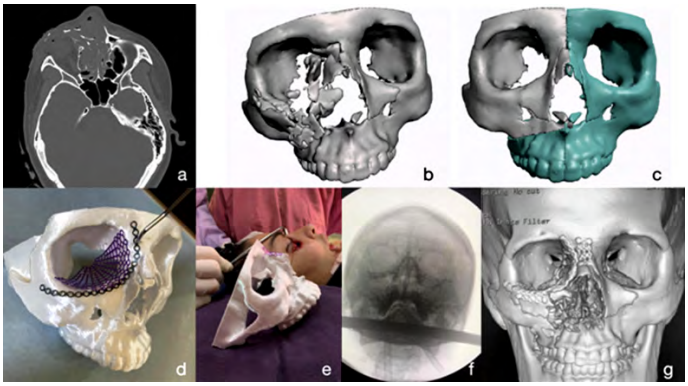


Figura 26 - Planificación quirúrgica virtual para fractura compleja de macizo facial
Paciente del 25 años, colaboración con el Departamento de Cirugía Plástica del Hospital de Clínicas. ***a)*** *TC, corte axial, donde se observa fractura compleja de región interna y piso de órbita y maxilar superior.* ***b)*** *Biomodelo ósea de la fractura compleja.* ***c)*** *Planificación virtual utilizando la técnica "imagen espejo" modelando la región a reparar a partir del lado contralateral sano.* ***d)*** *Impresión 3D del biomodelo con la fractura reparada para simulación prequirúrgica y moldeado de placas.* ***e)*** *Intraoperatorio, uso del biomodelo como guía de corrección quirúrgica.* ***f)*** *radiografía intraoperatoria y* ***g)*** *TC de control postoperatorio donde se observa la reparación de la fractura manteniendo la simetría de cara.*

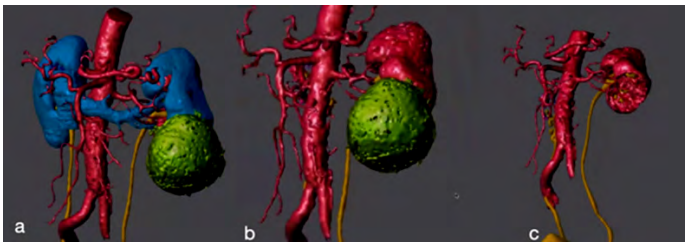


Figura 27 - Biomodelo 3D virtual de lesión renal
Construida desde TC con fines educativos. ***a)*** *Estructuras arteriales (rojo), venosas (azul), lesión (verde) y vía excretora (amarillo).* ***b)*** *Relación de la lesión con estructuras arteriales.*
c) *Visualización selectiva sin la lesión para estudio anatómico de la disposición de cavidades excretoras.*

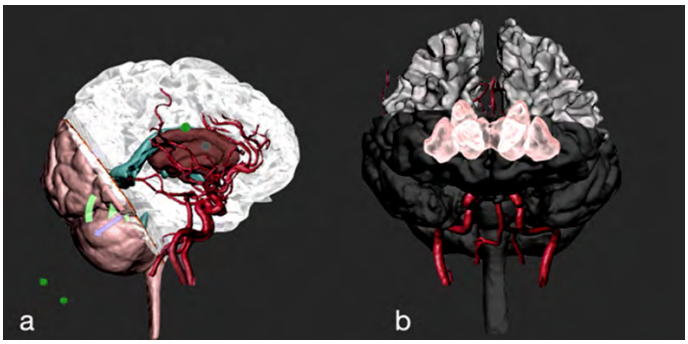


Figura 28 - Biomodelo 3D virtual encefálico
Segmentado desde imágenes de RM, con fines educativos, con las siguientes estructuras: sustancia gris, sustancia blanca, ganglios basales, vasos sanguíneos, ventrículos.

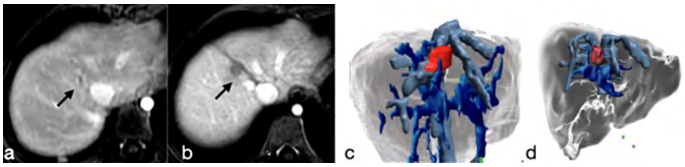


Figura 29 - Paciente pediátrico con recidiva de hepatoblastoma
Se muestra el corte axial de RM, secuencia T2, donde se muestra la lesión de recidiva en el año 2020 (flecha), b) en el año 2021 (flecha). Biomodelo 3D virtual de la lesión y sus relaciones vasculares en 2021 (c) y en 2021 en (d) que se utilizó para la planificación quirúrgica en ambas ocasiones.

Biomodelos en Educación y Entrenamiento

La impresión 3D abre la puerta a la formación y entrenamiento de recursos humanos a través de la simulación quirúrgica, lo cual se asocia con una mayor velocidad en la curva de aprendizaje (30, 37,38). El entrenamiento y la repetición de los procedimientos, son la base del éxito en pacientes complejos (36). La impresión 3D nos da la posibilidad de crear simuladores de pacientes complejos específicos y así preparar al equipo quirúrgico para una situación compleja en particular, dándoles la posibilidad de practicar el procedimiento, definir estrategias y prepararse para potenciales complicaciones (Figura 30).

Por otro lado, desde un punto de vista académico, la simulación con biomodelos impresos en 3D potencia la capacidad de formación de recursos humanos en hospitales escuela, haciendo posible que un mismo paciente permita la educación y entrenamiento de innumerables nuevos profesionales. Un biomodelo virtual puede almacenarse en el banco de memoria del departamento y ser impreso infinitas veces. El biomodelo impreso permite al docente practicar el procedimiento en un ambiente académico, fuera del block quirúrgico, donde hay espacio para más residentes, cada uno de los cuales puede incluso tener su propia copia para practicar. El ambiente de la simulación es seguro para aprender, equivocarse y probar diferentes estrategias, para que al momento de realizar la cirugía el procedimiento le sea familiar (Figura 31). Dado que es posible la impresión 3D de estructuras huecas, se pueden construir simuladores para colocación de vías, simuladores de endoscopía de vía aérea, de vía biliar o simuladores vasculares para práctica de procedimientos endovasculares complejos (46). Los biomodelos pueden ser de anatomía normal, de variantes anatómicas o anatomía patológica. Puede replicarse la anatomía de un paciente específico que necesita tratamiento o ser de pacientes genéricos. La impresión 3D permite también la realización de moldes en negativo de órganos, que luego pueden rellenarse con materiales blandos como gel de agarosa o gelatinas para simular la consistencia de órganos y construir simuladores.

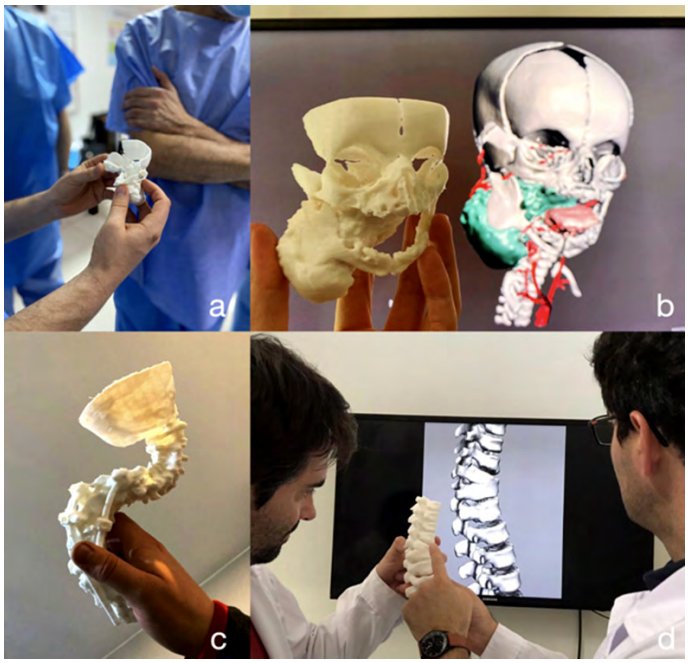


Figura 30
Uso de diversos modelos impresos en 3D para fines educativos, para entrenamiento del equipo tratante y comunicación con la familia del paciente.
a y b) *Biomodelo de cráneo y lesión del paciente presentado en la Figura 1, utilizado en la planificación pre quirúrgica en el block del hospital Pereira Rossell y complemento del estudio con biomodelo virtual en pantalla.*
c) *Impresión 3D en PLA de base de cráneo y segmento de columna espinal con material de fijación en un paciente pediátrico con escoliosis severa para uso en la planificación quirúrgica y comunicación con el paciente.*
d) *Estudio de segmento de columna dorsal con malformación congénita (hemivértebra) con complemento del biomodelo virtual en pantalla.*



Figura 31
Biomodelos impresos en 3D para entrenamiento de recursos humanos.
a) *Se muestra el procedimiento de colocación de vía intraósea en un biomodelo de tibia impreso en material PLA, para entrenamiento en realización de maniobras complejas. La resistencia que ofrece el material al pasaje de la cánula es muy similar a la que ejerce el hueso real, de ahí su gran utilidad para la práctica del procedimiento.*
b) *Posición final de la vía.*

DESVENTAJAS DEL USO DE BIOMODELOS 3D

Los tiempos de biomodelado e impresión 3D son considerados desventajas del uso de estas técnicas para la aplicación al tratamiento de pacientes complejos. En promedio, la disponibilidad de un biomodelo 3D anatómico virtual es entre 24 a 72hs, dependiendo de la región anatómica a biomodelar y del tipo y la calidad técnica de las imágenes DICOM a partir de las que se generarán. Para pacientes en los que es necesario la planificación virtual, el diseño e impresión 3D de guías quirúrgicas y piezas anatómicas, se debe considerar un tiempo mínimo de planificación de 5 a 10 días, necesario para llevar a cabo las etapas descritas en el apartado flujo de trabajo. La impresión 3D en sí misma, particularmente cuando se trata de piezas anatómicas grandes puede tardar varias horas en completarse, y a ello debemos sumarle el tiempo de postprocesado de las piezas para retirar material de soporte o lavar y curar con luz ultravioleta, como es el caso con la impresión en resinas (Figura 32). Estos tiempos pueden retrasar cirugías y determinan que tengan utilidad limitada en situaciones de urgencia. Dado que aún no forma parte de las prestaciones habituales en la mayoría de los centros de salud, estos tiempos tienden a extenderse aún más por demoras administrativas en la autorización de los mismos.

Si bien la tecnología 3D se asocia con una disminución de los costos anuales vinculado a la reducción de tiempos operatorios, como fue descrito (23) la inversión inicial en biomodelos y planificación quirúrgica, o los costos de instalación y mantenimiento de un laboratorio de biomodelado e impresión 3D intrahospitalario, se citan como causas de la no implementación de esta tecnología en varios centros de salud (47).

Finalmente, el biomodelado y la impresión 3D requieren recursos humanos con formación específica, ya sea imagenólogos entrenados en softwares de biomodelado o ingenieros biomédicos entrenados en trabajo clínico (47). Si bien aún no es amplia la disponibilidad, esta nueva subespecialidad se adapta a las nuevas pautas de teletrabajo, lo cual puede subsanar esta dificultad para su implementación.

Biomodelado 3D: una nueva subespecialidad en imagenología

La FDA (Food and Drug Administration) define una imagen médica como aquellas obtenidas por distintas tecnologías para visualizar partes del cuerpo humano con el objetivo de diagnosticar, examinar o tratar enfermedades. Los biomodelos 3D derivan específicamente de imágenes médicas en formato DICOM y dado que cumplen con la misma definición, pueden ser consideradas en sí mismas como imágenes médicas, y por lo tanto, podemos considerar esta área una nueva subespecialidad dentro de la Imagenología. La nueva especialidad está en la presentación de los hallazgos de imagen en este nuevo formato así como en la potencial impresión en 3D de imágenes del cuerpo humano, en contrapartida a la impresión en planchas en 2D dimensiones como lo hicimos hasta ahora. Los biomodelos 3D surgen de la segmentación, que utiliza software específico semiautomático pero que siempre requiere de revisión y validación manual de imágenes para asegurar su fidelidad, principalmente en patologías oncológicas complejas. Los médicos imagenólogos somos los únicos profesionales médicos entrenados específicamente en la interpretación de imágenes médicas y, como tal, los únicos idóneos en garantizar con seguridad la precisión de los biomodelos 3D. Esta nueva subespecialidad extiende el área de actuación de los médicos imagenólogos al diseño de estrategias y herramientas útiles en el tratamiento de pacientes. Nos abre puertas a participar de la planificación y ejecución de un tratamiento quirúrgico, acercando ambas especialidades y permitiéndonos involucrarnos aún más con nuestros pacientes. Como es natural, dada la complejidad de las herramientas necesarias para lograr estas imágenes virtuales e impresas en 3D y siendo la profesión que desarrolla las mismas, esta nueva subespecialidad se solapa ampliamente con ramas de la ingeniería biomédica, y veremos por ello mucha presencia de dichos profesionales en el área, quienes con el tiempo colaborarán cada vez más con nuestros departamentos de imagenología. Sin embargo, es frecuente ver ingenieros brindando servicios de biomodelado e impresión 3D que no se apoyan de la supervisión de profesionales imagenólogos, simplemente porque hasta el momento no se ha cuestionado la necesidad y no se identifican los riesgos potenciales. Está en nosotros hacer notar esa necesidad, reclamar nuestro lugar

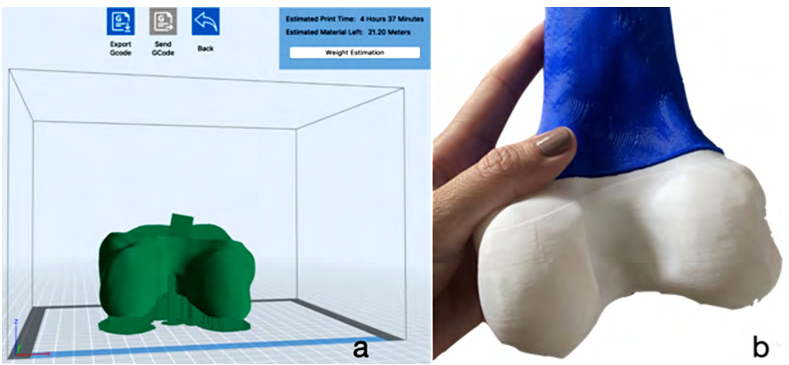


Figura 32
Tiempos de impresión
a) *Impresión de pantalla del Software Cura v 4.7, durante la preparación para la impresión 3D, en material PLA, donde puede verse el estimativo de material (21.2 metros) y el tiempo estimado de impresión (4 horas, 37 minutos), para un segmento de epífisis femoral distal, que se muestra en* ***b)*** *en color blanco.*

y hacerlo parte de nuestra carrera profesional.
Como en toda nuestra especialidad, habrá quienes decidan entrenarse específicamente en el área y para otros bastará con actualizaciones más generales. Sin embargo, es importante conocer los requerimientos de imagen para que las mismas puedan ser usadas en la construcción de biomodelos 3D, ya que de ello dependerá la posibilidad de biomodelado y la calidad final del biomodelo 3D.
En el Hospital Pereira Rossell trabajamos en biomodelado e impresión 3D desde el año 2019, en el Área de Innovación del Departamento de Imagenología, un sector específicamente creado para el desarrollo de nuevas tecnologías vinculadas a la Imagenología. Trabajamos en colaboración con las distintas cátedras de dicho hospital y de la Universidad de la República en la Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D en pacientes complejos y en el desarrollo de simuladores para entrenamiento de recursos humanos. Todos los casos presentados en este trabajo han sido trabajados por nuestro grupo, en el que actualmente trabajan 5 médicos imagenólogos, un licenciado en imagenología y cuenta con el apoyo de ingenieros y profesores de la Escuela Universitaria Centro de Diseño. Contamos con una impresora de tipo FDM (Ultimaker S2) y una impresora de resina (Anycubic Photon S) con su correspondiente estación de lavado y curado con luz UV (Anycubic), con los cuales fueron realizadas las impresiones que se muestran en el presente artículo.

Flujo de trabajo

El flujo de trabajo en pacientes en los que es necesaria la planificación quirúrgica virtual requiere de un fuerte trabajo en equipo entre clínicos, imagenólogos, licenciados en imagenología y el equipo de la unidad de planificación quirúrgica virtual (PQV). El diagrama de la figura 33 muestra todos los pasos desde que surge un paciente complejo hasta que se entregan los biomodelos 3D virtuales o impresos en 3D al equipo clínico; el médico radiólogo que se subespecializa en esta área aporta desde su experiencia en todos ellos. De forma ideal, el trabajo comienza previo a la adquisición de imágenes, con la discusión entre clínicos e imagenólogos respecto del mejor método de imagen para satisfacer las necesidades diagnósticas y, de ser necesario, planificar ajustes al momento de la adquisición para lograr, a partir de dichos estudios, biomodelos de calidad óptima (por ejemplo, planificar adquisiciones volumétricas en determinada secuencia de RM). Al momento de la adquisición, el médico radiólogo es imprescindible en la toma de decisiones que permitan obtener estudios de calidad diagnóstica, en tiempos adecuados, con secuencias con máxima definición de contraste para el análisis anatómico. El trabajo del licenciado en imagenología en la reconstrucción de los volúmenes es clave: desde el ajuste de los parámetros de adquisición para lograr la mejor calidad y el menor número de artefactos, pasando por su trabajo con los algoritmos de reconstrucción en el post procesamiento de la rawdata para lograr imágenes de buena calidad. La generación de los biomodelos 3D a partir de las imágenes DICOM, debe, desde nuestro punto de vista ser realizada o estrictamente supervisada por un médico imagenólogo, dada la importancia de etiquetar adecuadamente cada tejido y sus límites, especialmente cuando se trata de pacientes oncológicos. Una vez listo el biomodelo 3D se realiza una reunión con el equipo clínico durante la cual se navega el biomodelo 3D y se consideran las opciones terapéuticas. Se realizan simulaciones virtuales de las diferentes opciones hasta llegar a la alternativa con mejores resultados y menores riesgos para el paciente. Si es necesario el diseño de guías quirúrgicas, se discuten los detalles de diseño durante el ateneo. Entre estos detalles están por ejemplo la topografía de apoyo de las bases de guía y la localización y número de fijadores. La segunda etapa de trabajo en la unidad de PQV es el diseño de estas herramientas, utilizando software de diseño 3D. Una vez listo el diseño de guías se aprueban durante una nueva

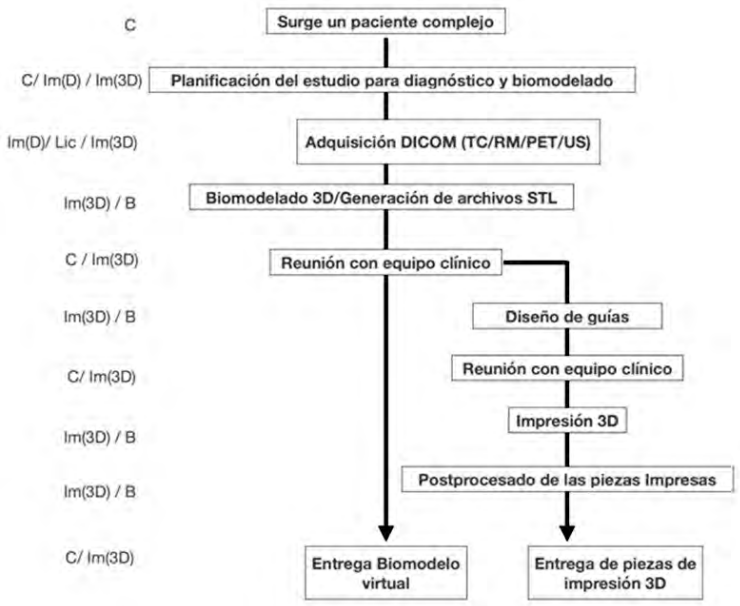


Figura 33
Diagrama del flujo de trabajo del equipo de planificación quirúrgica virtual
La columna de la izquierda nombra los integrantes del grupo de trabajo en cada paso: clínicos,C, imagenólogos del área diagnóstica, Im (D), licenciados en imagenología, Lic, imagenólogos especializados en el área 3D, Im (3D), bioingenieros, B.

reunión con el equipo clínico, en la cual se dará el visto bueno para su impresión 3D y se decidirá si es necesaria la impresión de piezas anatómicas para simulación o para uso en block quirúrgico. Esta nueva instancia que se crea en la preparación para una cirugía habilita al imagenólogo a participar y asistir aún más activamente en la planificación del tratamiento de los pacientes, acortando el gap entre nuestro habitual rol diagnóstico y la terapéutica. La etapa final de trabajo es la impresión 3D de las piezas, que implica la selección del material de impresión, que variará según el uso que se dará a las mismas. Se utilizan softwares de preparación para la impresión 3D en los que se posicionan las piezas, se colocan los soportes, se elige la velocidad de impresión y altura de capa, entre otros elementos que variarán la calidad final de la pieza impresa. Luego de finalizada la impresión, resta el post procesado de las piezas, en la que se retiran los soportes, se limpian las piezas, se colocan imanes o se ensamblan si fueron impresas por partes. Por último, se acondicionan para ser entregadas al equipo clínico, con su correspondiente identificación e información sobre el método de esterilización de las mismas.

CONCLUSIONES

Los biomodelos 3D son un nuevo tipo de imagen médica que surge de nuevas tecnologías que permiten crear imágenes en tres dimensiones desde imágenes DICOM volumétricas como la TC y la RM para análisis anatómico y planificación de tratamientos quirúrgicos de pacientes complejos. Se presentan los requerimientos de imagen, el proceso de generación de los biomodelos y flujo de trabajo en estos pacientes. Se describen las principales aplicaciones en las diferentes especialidades quirúrgicas que más hacen uso de esta tecnología y se exponen casos clínicos que se han trabajado en el Área de Innovación del Hospital Pereira Rossell para pacientes de la Universidad de la República.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener conflicto de interés.

REFERENCIAS

1. Mitsouras, Dimitris, et al. "Medical 3D printing for the radiologist." Radiographics 35.7 (2015): 1965-1988.
2. Talanki, Varsha R., et al. "Three-Dimensional Printed Anatomic Models Derived From Magnetic Resonance Imaging Data: Current State and Image Acquisition Recommendations for Appropriate Clinical Scenarios." Journal of Magnetic Resonance Imaging (2021).
3. Parthasarathy, Jayanthi, et al. "3D printing with MRI in pediatric applications." Journal of Magnetic Resonance Imaging 51.6 (2020): 1641-1658.
4. Amorim P., Moraes T., Silva J., Pedrini H. (2015) InVesalius: An Interactive Rendering Framework for Health Care Support. In: Bebis G. et al. (eds) Advances in Visual Computing. ISVC 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9474. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27857-5_5
5. Kikinis R, Pieper SD, Vosburgh K (2014) 3D Slicer: a platform for subject-specific image analysis, visualization, and clinical support. Intraoperative Imaging Image-Guided Therapy, Ferenc A. Jolesz, Editor 3(19):277–289 ISBN: 978-1-4614-7656-6 (Print) 978-1-4614-7657-3 (Online)
6. Kamio, T., Suzuki, M., Asaumi, R. et al. DICOM segmentation and STL creation for 3D printing: a process and software package comparison for osseous anatomy. 3D Print Med 6, 17 (2020). https://doi.org/10.1186/s41205-020-00069-2
7. Zhu, Z. H., et al. "Short review of polymer composites for 3D Printing." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 758. No. 1. IOP Publishing, 2020.
8. Chan, David S., et al. "Exploring polycaprolactone in tracheal surgery: A scoping review of in-vivo studies." International journal of pediatric otorhinolaryngology 123 (2019): 38-42.
9. Attarilar, Shokouh, et al. "3D Printing technologies in metallic implants: A thematic review on the techniques and procedures." International Journal of Bioprinting 7.1 (2021).
10. Mobaraki, Mohammadmahdi, et al. "Bioinks and bioprinting: A focused review." Bioprinting 18 (2020): e00080.
11. Shakibania, Sara, et al. "Medical application of biomimetic 4D printing." Drug Development and Industrial Pharmacy 47.4 (2021): 521-534.
12. Javaid, Mohd, and Abid Haleem. "Significant advancements of 4D printing in the field of orthopaedics." Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma 11 (2020): S485-S490.
13. Zambouri, A. "Preoperative evaluation and preparation for anesthesia and surgery." Hippokratia 11.1 (2007): 13
14. Belien H at al: Prebending of osteosynthesis plate using 3D printed models to treat symptomatic os acromiale and acromial fracture. J Exp Orthop 2017.
15. Punyaratabandhu, Thipachart, Peter C. Liacouras, and Sutipat Pairojboriboon. "Using 3D models in orthopedic oncology: presenting personalized advantages in surgical planning and intraoperative outcomes." 3D printing in medicine 4.1 (2018): 1-13.
16. Schwartz, L. H., et al. "Volumetric 3D CT analysis-an early predictor of response to therapy." Journal of Clinical Oncology 25.18_suppl (2007): 4576-4576.

17. Hallet, Julie, et al. "Systematic review of the use of pre-operative simulation and navigation for hepatectomy: current status and future perspectives." Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences 22.5 (2015): 353-362.
18. Biglino, Giovanni, et al. "Involving patients, families and medical staff in the evaluation of 3D printing models of congenital heart disease." Communication & medicine 12.2-3 (2016): 157-169.
19. Sternheim, Amir, et al. "3D Printing in Orthopedic Oncology." 3D Printing in Orthopaedic Surgery. Elsevier, 2019. 179-194.
20. Bizzotto N, Sandri A, Regis D, Romani D, Tami I, Magnan B: Three-dimensional printing of bone fractures: A new tangible realistic way for preoperative planning and education. Surg Innov 2015;5:548-551.
21. Kang HJ, Kim BS, Kim SM, et al. : Can preoperative 3D printing change surgeon's operative plan for distal tibia fracture? Biomed Res Int 2019;2019:7059413.
22. Wan, Lei, et al. "Clinical feasibility and application value of computer virtual reduction combined with 3D printing technique in complex acetabular fractures." Experimental and therapeutic medicine 17.5 (2019): 3630-3636.
23. Ballard D, Mills P, Duszak R, Weisman J, Rybicki F, Woodard P: Medical 3D printing cost-savings in orthopedic and maxillofacial surgery: Cost analysis of operating room time saved with 3D printed anatomic models and surgical guides. Acad Radiol 2020;27:1103-1113.
24. Li, Jun, et al. "Rational design, bio-functionalization and biological performance of hybrid additive manufactured titanium implants for orthopaedic applications: A review." Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 105 (2020): 103671
25. Nguyen, Bach, et al. "Cranioplasty Using Customized 3-Dimensional–Printed Titanium Implants: An International Collaboration Effort to Improve Neurosurgical Care." World Neurosurgery 149 (2021): 174-180
26. Giannopoulos, Andreas A., et al. "Cardiothoracic applications of 3D printing." Journal of thoracic imaging 31.5 (2016): 253.
27. Milano, Elena Giulia, et al. "Current and future applications of 3D printing in congenital cardiology and cardiac surgery." The British journal of radiology 92.1094 (2019): 20180389.
28. Jackson K S Kwok, Rainbow W H Lau, Ze-Rui Zhao, Peter S Y Yu, Jacky Y K Ho, Simon C Y Chow, Innes Y P Wan, Calvin S H Ng. Multidimensional printing in thoracic surgery: current and future applications. J Thorac Dis 2018;10(Suppl 6):S756. doi: 10.21037/jtd.2018.02.91.
29. Jon Zabaleta, Borja Aguinagalde, Iker López, Stephany M Laguna, Mikel Mendoza, Ainhoa Galardi, Luis Matey, Andrea Larrañaga, Gorka Baqueriza, Ander Izeta. Creation of a multidisciplinary and multicenter study group for the use of 3D printing in general thoracic surgery: lessons learned in our first year experience. Med Devices (Auckl). 2019 May 2;12:143-149. doi: 10.2147/MDER.S203610. eCollection 2019.
30. Hu, Wenbin, et al. "Three-dimensional computed tomography angiography and bronchography combined with three-dimensional printing for thoracoscopic pulmonary segmentectomy in stage IA non-small cell lung cancer." Journal of Thoracic Disease 13.2 (2021): 1187.
31. Li, Chengrun, et al. "Augmented Reality and 3-Dimensional Printing Technologies for Guiding Complex Thoracoscopic Surgery." The Annals of Thoracic Surgery (2020).
32. Bumm, R., et al. "First results of spatial reconstruction and quantification of COVID-19 chest CT infiltrates using lung CT analyzer and 3D slicer." British Journal of Surgery 108.Supplement_4 (2021): znab202-077.
33. Senkoylu, Alpaslan, Ismail Daldal, and Mehmet Cetinkaya. "3D printing and spine surgery." Journal of Orthopaedic Surgery 28.2 (2020): 2309499020927081.
34. Sun, Xiaojiang, et al. "Progress in the Application of 3D Printing Technology in Spine Surgery." Journal of Shanghai Jiaotong University (Science) 26.3 (2021): 352-360
35. Wang, Pengfei, et al. "The effect of new preoperative preparation method compared to conventional method in complex acetabular fractures: minimum 2-year follow-up." Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery 141 (2021): 215-222.
36. Marinescu, Rodica, Diana Popescu, and Dan Laptoiu. "A Review on 3D-Printed Templates for Precontouring Fixation Plates in Orthopedic Surgery." Journal of Clinical Medicine 9.9 (2020): 2908.
37. Cuervas-Mons, Manuel, et al. "3D Printing Surgical Guide for Nonunion: Technique Tip." Techniques in Orthopaedics (2021).
38. Shen, Sheng, et al. "Pre-operative simulation using a three-dimensional printing model for surgical treatment of old and complex tibial plateau fractures." Scientific reports 10.1 (2020): 1-11.
39. Holt, Andrew M., et al. "Rapid prototyping 3D model in treatment of pediatric hip dysplasia: a case report." The Iowa orthopaedic journal 37 (2017): 157.
40. Lin, Alexander Y., and Lauren M. Yarholar. "Plastic surgery innovation with 3D printing for craniomaxillofacial operations." Missouri medicine 117.2 (2020): 136.
41. Lin, Hsiu-Hsia, Daniel Lonic, and Lun-Jou Lo. "3D printing in orthognathic surgery— A literature review." Journal of the Formosan Medical Association 117.7 (2018): 547-558.
42. Ganguli, Anurup, et al. "3D printing for preoperative planning and surgical training: a review." Biomedical microdevices 20.3 (2018): 1-24.
43. Smith, Brandon, and Prokar Dasgupta. "3D printing technology and its role in urological training." World journal of urology 38.10 (2020): 2385-2391.
44. Thiong'o, Grace M., Mark Bernstein, and James M. Drake. "3D printing in neurosurgery education: a review." 3D Printing in Medicine 7.1 (2021): 1-6.
45. Sánchez-Sánchez, Ángela, et al. "Three-dimensional printed model and virtual reconstruction: an extra tool for pediatric solid tumors surgery." European journal of pediatric surgery reports 6.01 (2018): e70-e76.
46. Kwon, Chang-Il, et al. "Production of ERCP training model using a 3D printing technique (with video)." BMC gastroenterology 20 (2020): 1-9.
47. Martelli, Nicolas, et al. "Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: a systematic review." Surgery 159.6 (2016): 1485-1500