

# Impresión 3D de imágenes médicas: un ejemplo de aplicación en docencia



*Cano Papadakis Gabriela  
Mera Espinoza Betzabet del Carmen  
Rebolledo Bustillo María de Jesús  
Rodríguez Jiménez Pedro Misael  
Cruz Morales Abigail  
Lorenzo Vázquez Ilse Yareni*

## Introducción

Desde el principio de la antigüedad hasta finales del siglo XIX, las únicas técnicas empleadas para sentir señales y anomalías en el cuerpo humano fueron la palpación y la auscultación.

Fue hasta 1887 cuando se registró el primer electrocardiograma por parte de Augustus Waller en un perro, y en 1901 cuando se empleó en humanos por primera vez, gracias a la invención del sistema de Wilhelm Einthoven.

Los rayos-X fueron descubiertos por Wilhelm Röntgen en 1895 cuando estudiaba los fenómenos de fluorescencia en tubos de rayos catódicos. Su primera aplicación documentada en la clínica fue en 1896 cuando se tomó una radiografía de la mano de un paciente con fracturas en Dartmouth Collage.

Las coincidencias temporales de las dos áreas tecnológicas de mayor impacto en la actualidad: la instrumentación y la imagenología médica se deben a los avances en la física en ese final del siglo XIX. Hoy en día estos avances y la importancia de los dos tipos de técnicas y sistemas siguen avanzando de forma paralela. Los gastos en tecnología médica se distribuyen equitativamente entre las dos áreas.

## Imagenología Médica en el siglo XXI

En los últimos 25 años, las tecnologías de imagenología médica han avanzado significativamente. A continuación, se presentan los principales tipos de modalidades de imagenología y sus desarrollos clave:

### 1. Rayos X y Tomografía Computarizada (TC)

Rayos X (Radiografía): La radiografía 2D

tradicional sigue siendo una herramienta fundamental, y los avances en la radiografía digital mejoran la calidad de la imagen y reducen la dosis de radiación.

Tomografía Computarizada (TC): La TC multicorte inició a finales de la década de 1990. Permite adquirir múltiples cortes en una sola rotación, lo que mejora la velocidad y la resolución.

TC de energía dual: Se pueden obtener diferencias entre los tejidos según su absorción a dos energías de rayos X diferentes.

### 2. Resonancia Magnética (RM)

La RM de alto campo (3T y superior): Ofrece mayor resolución para imágenes neurológicas, musculoesqueléticas y cardiovasculares.

La RM funcional (RMf): Mide la actividad cerebral detectando cambios en el flujo sanguíneo, ampliamente utilizada en neurociencia.

Las Imágenes por Tensor de Difusión (ITD): Es una técnica que permite mapear los tractos de sustancia blanca en el cerebro (axones y nervios).

### 3. Ultrasonido (US)

Ultrasonido 3D/4D: Se utiliza en obstetricia y cardiología, ofreciendo imágenes volumétricas en tiempo real.

Elastografía: Mide la rigidez tisular, útil en la detección de enfermedades hepáticas y cáncer.

Ultrasonido con Contraste (CEUS): Utiliza agentes de contraste de microburbujas para mejorar la imagen del flujo sanguíneo en órganos como el hígado y el corazón.

Ultrasonido con IA: Permite la adquisición e interpretación automatizadas de imágenes, mejorando la precisión.

#### **4. Medicina Nuclear (PET y SPECT)**

Tomografía por Emisión de Positrones (PET): PET/TC y PET/RM híbridas: Combinan imágenes metabólicas y anatómicas, mejorando el diagnóstico del cáncer y la neurología.

Tomografía Computarizada por Emisión de Fotón Único (SPECT): Detectores mejorados y nuevos trazadores optimizan la imagenología para cardiología y neurología.

#### **5. Tecnologías Ópticas y Emergentes de Imagen**

Imagen Fotoacústica: Una técnica híbrida que combina ultrasonido y señales inducidas por láser, útil en oncología e imagen vascular.

Imagen Fluorescente y Molecular: Utiliza colorantes específicos para visualizar procesos celulares y moleculares, aplicados en oncología y navegación quirúrgica.

#### **6. Inteligencia Artificial (IA) y Procesamiento de Imágenes**

Los algoritmos con IA mejoran la reconstrucción de imágenes, la reducción de ruido y el diagnóstico. El aprendizaje profundo está revolucionando la radiología al facilitar la detección de tumores, fracturas y otras anomalías.

La evolución de las técnicas de imagenología médica lleva hacia una mayor resolución, una adquisición más rápida, una menor exposición a la radiación y diagnósticos basados en IA. Estos avances continúan impulsando la detección temprana de enfermedades, la medicina personalizada y el diagnóstico no invasivo.

En la actualidad la radiografía convencional sigue siendo la más empleada a nivel mundial, a lo mejor porque permite visualizar rápidamente y a bajo costo una gran cantidad de problemas anatómicos.

Sin embargo, las dos técnicas tomográficas más comunes, IRM y TAC tienen mayor resolución y permiten visualizar de mejor manera el interior del cuerpo humano. Se estima que el 25% de los estudios de imagenología emplean estas dos modalidades.

#### **Impresión 3D de imágenes médicas.**

Las tecnologías de visualización e impresión 3D han revolucionado la medicina al transformar imágenes médicas en modelos físicos o digitales interactivos.

Sus primeros usos documentados fueron en 1993, cuando se emplearon modelos basados en tomografías computadas para la planeación quirúrgica.

En realidad, es una extensión natural de la imagenología tomográfica: Si ya se tienen los cortes bidimensionales, se pueden apilar las rebanadas de estos y se puede armar un modelo completo.

Sus principales ventajas incluyen:

1. **Mejor Comprensión Anatómica**, ya que permite visualizar estructuras complejas en tres dimensiones, mejorando la interpretación de tomografías, resonancias magnéticas y ecografías. Además, facilita el estudio detallado de tumores, fracturas, malformaciones congénitas y órganos internos.
2. **Planificación Quirúrgica Precisa**: Los cirujanos pueden ensayar procedimientos con modelos 3D personalizados,

reduciendo errores y tiempos de operación. Además, mejora la precisión en neurocirugía, ortopedia, cirugía cardíaca y maxilofacial.

### 3. Educación y Formación Médica

Los modelos 3D ayudan a estudiantes y médicos a comprender mejor la anatomía y patologías sin necesidad de emplear cadáveres. Permite simulaciones quirúrgicas para el entrenamiento de especialistas.

### 4. Personalización de Dispositivos Médicos y Prótesis

Se pueden fabricar implantes, prótesis y guías quirúrgicas personalizadas, mejorando la adaptación al paciente.

En ortopedia y odontología, se diseñan piezas a medida para mayor confort y funcionalidad.

### 5. Comunicación Médica y Paciente

Facilita la explicación de enfermedades y tratamientos a los pacientes, mejorando su comprensión y confianza. Puede ser una ayuda en la toma de decisiones conjuntas entre médicos y pacientes.

### 6. Reducción de Costos y Tiempo

Disminuye la necesidad de pruebas adicionales al mejorar la planificación. Reduce complicaciones quirúrgicas y mejora la recuperación postoperatoria.

Para poder armar una imagen completa en tres dimensiones, es necesario poder procesar los cortes en un espacio 3D, además de emplear técnicas de proyección, sombreado y segmentación de las imágenes.

Los pasos normales por seguir, para un corazón, por ejemplo, son:

#### 1. Adquisición de la Imagen Médica

Se obtiene una Tomografía Computarizada (CT) o Resonancia Magnética (MRI) con cortes finos (<1 mm) para capturar detalles anatómicos.

Se usan secuencias optimizadas para visualizar el corazón y vasos sanguíneos (ej., angiografía por TC).

#### 2. Procesamiento y Segmentación de la Imagen

Se exportan las imágenes en formato DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

Se utiliza un software de segmentación (ej., 3D Slicer, Mimics, OsiriX) para: Eliminar estructuras no deseadas (pulmones, huesos, etc.), aislar las cavidades cardíacas, arterias coronarias o válvulas y convertir los datos en un modelo 3D.

#### 3. Conversión a Formato de Impresión 3D

Se guarda el modelo segmentado en formato STL (Standard Tessellation Language), compatible con impresoras 3D.

Se optimiza la malla 3D (reducción de ruido, suavizado, reparación de agujeros).

Se ajusta la escala y el nivel de detalle según el propósito del modelo (ej., cirugía, educación, planificación de implantes).

#### 4. Elección de Material e Impresión 3D

Se selecciona la tecnología de impresión según la aplicación:

FDM (Fused Deposition Modeling): Económica, útil para modelos rígidos básicos.

SLA (Stereolithography) o PolyJet: Mayor resolución, ideal para modelos detallados.

Multi-material (Stratasys, Formlabs): Permite imprimir partes flexibles (simulación de tejidos).

#### 5. Postproceso y Validación

Se eliminan soportes de impresión y se realiza limpieza y curado si se usaron resinas.

Se compara con la imagen original para verificar precisión anatómica.

Si es un modelo para cirugía, se revisa con el equipo médico antes de su uso.

#### Aplicación Práctica

En este trabajo, aplicaremos dos técnicas:

La segmentación por umbralización y por crecimiento de regiones, utilizando el formato DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) para construir un modelo 3D de un corazón con un bypass. El proceso de segmentación es fundamental para separar las diferentes estructuras anatómicas presentes en las imágenes médicas, y elegir el mejor resultado para la impresión 3D.

Finalmente, se presentarán y discutirán los resultados, incluyendo posibles problemas encontrados durante el proceso. Evaluaremos la calidad de la impresión y la presencia de anomalías médicas en el modelo impreso. Este enfoque no solo mejora la evaluación diagnóstica, sino que también facilita la planificación de tratamientos y la educación médica.

#### Protocolo

El archivo de tipo DICOM fue proporcionado por el Centro Nacional de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica (CI3M) de un paciente anónimo, en

donde muestra una tomografía del tórax. Estas imágenes deberán ser cargadas en el software elegido para su segmentación.

El software que será utilizado es 3D Slicer. Mediante este proceso podremos convertir cualquier estructura del archivo DICOM a STL con máxima precisión, en este caso nuestra ROI

Al desglosar las opciones de *Segment Editor* se encuentran diversas opciones que se pueden emplear. Nosotros utilizaremos principalmente es Grow from seeds (crecimiento de regiones). Este es un método semiautomático para la segmentación con 3D Slicer. Utiliza áreas llamadas semillas como referencia y extiende el segmento hasta rellenar el área delimitada. Esta herramienta identifica las zonas donde la intensidad cambia abruptamente y define esta unión como el límite para cada segmento.

Para utilizar la herramienta de semillas, primero se utiliza una herramienta para ajustar el brillo y el contraste que en la pantalla se muestra como un icono en la barra superior, esto con la finalidad de hacer ver mejor los bordes de la imagen y ajustar la opacidad requerida para identificar las distintas partes del corazón. Una alternativa que se puede usar en vez del ajuste de brillo y contraste es el efecto Threshold, umbral, que es una función que tiene el objetivo de seleccionar elementos que se encuentren dentro de un rango de intensidad. Esta es la manera más simple de convertir un DICOM a STL cuando el tejido a segmentar está bien delimitado. Por ejemplo, el hueso.

La opción *Use for Masking* almacena el rango de intensidad seleccionado para utilizarlo con las demás herramientas.

Otros efectos como pintar o dibujar sirven para señalar las áreas que pertenezcan a cada parte del órgano. Como mínimo debe haber 2 segmentos. Se agregaron 7 segmentos con los nombres de los ventrículos y aurículas derechas e izquierdas, vena cava, arteria pulmonar y aorta.

Cuando la segmentación sea adecuada se valida y esto dejará ver la imagen del modelo en colores más saturados y ese será el modelo 3D del corazón final que posteriormente será convertido a formato STL.

Una vez que estemos satisfechos con el segmento que hemos logrado solo queda exportarlo. La forma más sencilla es utilizando el panel de segmentaciones. En esta sección vamos a seleccionar las casillas Export y Models.

El procedimiento específico que se empleó fue:

1. En el software 3D Slicer se cargó la CT de tórax en formato DICOM.
2. Ajustamos el contraste y el brillo de la CT con el parámetro Window/Level para mejorar la visualización de las estructuras anatómicas.
3. En el menú "Segment Editor" creamos dos nuevos segmentos que le corresponden a los pulmones y a los huesos.
4. Con la herramienta "Threshold" ajustamos el rango de intensidades para para cada segmento.
5. Refinamos esta segmentación en el modelo 3D con la herramienta "Scissor".
6. Creamos los segmentos: pulmón izquierdo, pulmón derecho, corazón, aorta, vena cava superior, vena cava inferior, vena braquiocefálica izquierda, vena braquiocefálica derecha, tronco braquiocefálico, bypass y apéndice auricular izquierdo.
7. Se utilizó la herramienta "Grow from Seeds" para segmentar las estructuras

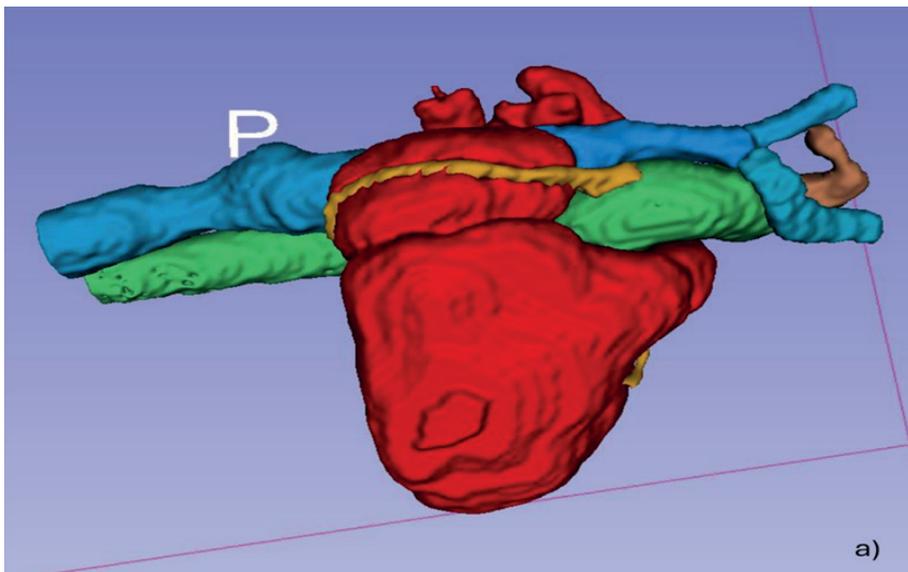


Figura 1. Imagen segmentada del estudio cardíaco

anatómicas de interés. Colocamos las semillas manualmente para cada uno de los segmentos.

8. Volvimos a utilizar la herramienta "Scissors" para eliminar fragmentos que no correspondían
9. Aplicamos la herramienta "Smoothing" para suavizar bordes y eliminar irregularidades.
10. Exportamos la segmentación en formato STL.

La última parte será la impresión en 3D, para esto se utilizó el software Cura. En este software es posible abrir el modelo en formato STL exportado de 3D Slicer, en el será posible hacer las configuraciones de la impresora según lo que creamos correcto y según la impresora que vamos a utilizar, en este caso, una impresora modelo Ender 3 V3 SE que se selecciona en CURA. Una vez seleccionando la impresora, se procede a seleccionar los valores de las características como sigue:

Volumen de impresión: 220mm x 220mm x 250mm

Tipo de extrusor: La extrusora directa

"Sprite" de Ender 3 V3 SE permite una alimentación suave de varios filamentos, incluidos PLA, PETG y materiales flexibles TPU, que ya no se limitan a materiales de impresión.

Tipo de boquilla: Boquilla Creality de 0.4mm.

Altura de capa: Elegimos un valor bajo (como 0.1 mm) para obtener mayor detalle en el modelo del corazón.

Relleno: Configuramos el porcentaje de infill (relleno interno). En este caso usamos 20%

También es necesario ajustar la orientación del objeto a imprimir, lo que permite ahorrar material y sobre todo que la impresión tenga mejor soporte, el modelo se puede rotar y mover hacia diversos lados para que este dentro de los límites de nuestra impresora y no tenga ningún problema de movimiento, también es importante agregar un poco de pegamento en la base para que la impresora pueda comenzar su impresión sin problemas de movimiento. Se puede utilizar un soporte "Automático" o tipo "árbol". Para este caso en particular se decidió utilizar soportes de tipo "Automático"



Figura 2. Resultados de la impresión 3D de la imagen segmentada en la figura 1.

### **Análisis de Resultados**

Durante el proceso de segmentación en 3D Slicer, enfrentamos algunas dificultades al intentar identificar y diferenciar las diversas estructuras anatómicas. Los huesos y los pulmones fueron relativamente fáciles de segmentar debido a las claras diferencias en sus densidades, lo que permitió utilizar herramientas como Threshold para identificarlos rápida y correctamente. Sin embargo, la segmentación de las estructuras cardíacas, en particular los bypass y algunas regiones del corazón, fue de mayor complejidad debido a la baja diferencia de densidad entre los tejidos. Esta similitud en las intensidades hizo que delimitar cada segmento fuera más complicado, especialmente para las áreas más pequeñas y delicadas, como los bypasses.

Durante la fase de impresión 3D en Ultimaker Cura, también se presentaron varias dificultades. En un primer intento, había demasiados hilos y las capas resultaban muy irregulares y desordenadas. En un segundo intento, logramos generar aproximadamente 30 capas regulares, pero después volvieron a aparecer problemas con la formación de hilos. Además, la primera capa de todas las impresiones salió muy delgada. Estos problemas pudieron haber sido causados por un ajuste inadecuado de parámetros como la velocidad de impresión o el relleno. Con nuestra tercera configuración, logramos generar capas más regulares, lo que mejoró la claridad de la impresión y permitió visualizar con precisión uno de los bypasses. Los otros dos, al ser más pequeños y estar menos a la vista, se vieron cubiertos por los soportes, lo que hizo que fuera difícil verlos incluso después de la refinación manual.

### **Discusión**

Realizamos la impresión de un modelo de corazón con tres bypasses utilizando el método de Material Extrusión, en el cual el material se calienta y se extruye a través de una boquilla para construir el modelo capa por capa. Durante el proceso, aprendimos que cada material tiene un tipo de soporte interno que hace necesario el uso de boquillas con el diámetro exacto del material para hacer la extrusión. Además, comprendimos la importancia del manejo adecuado del software de impresión 3D, ya que este nos permite evaluar si contamos con suficiente material y estimar el tiempo total de impresión. Un aspecto clave fue la adición de soportes para garantizar la estabilidad del modelo. Si bien estos son esenciales para evitar su colapso, hay que colocarlos estratégicamente, ya que un exceso de soportes puede dificultar la visualización de detalles importantes. Una alternativa para optimizar su uso es modificar la orientación del modelo, de modo que se reduzca la cantidad de soportes sin comprometer la estabilidad de la impresión. Otro aspecto relevante fue la supervisión del proceso de impresión, al menos durante el primer tercio de la impresión total. En esta fase inicial es donde suelen presentarse los problemas derivados de una configuración inadecuada, como errores en la adhesión de capas o fallos en la extrusión del material. Una vez superada esta etapa, es menos probable que ocurran defectos graves en la impresión.

### **Conclusiones**

La impresión 3D es una herramienta bastante útil pero tediosa. Se debe contar con un conocimiento profundo de las estructuras que se desean reproducir, como las anatómicas en proyectos de modelado de órganos, para asegurar que los mode-

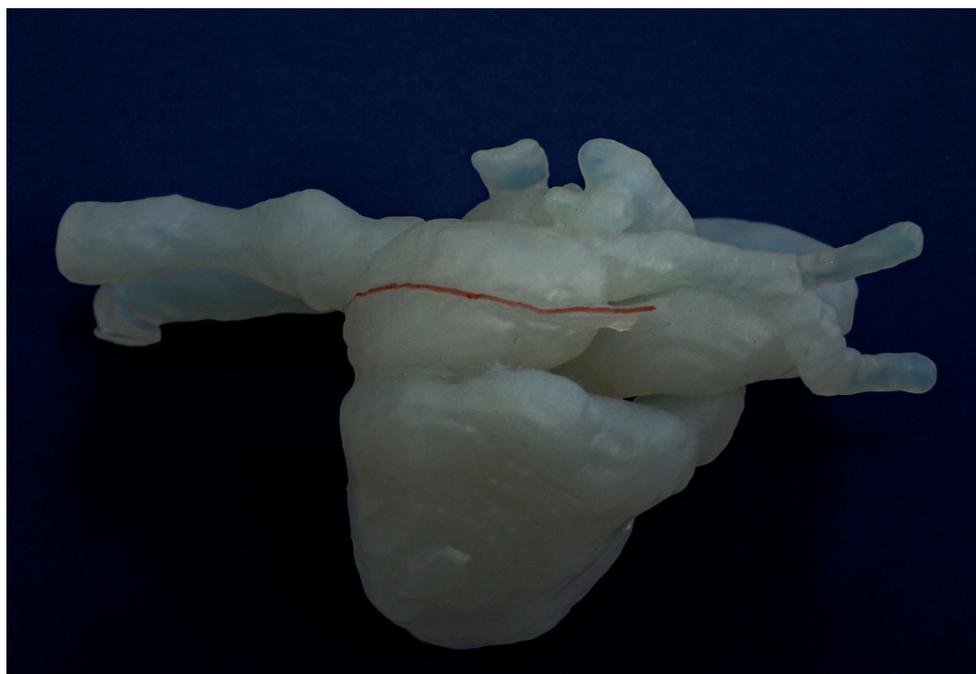
los sean precisos y funcionales. Además, se debe prestar atención a las especificaciones técnicas de la impresora, como la velocidad de impresión, los soportes y la calidad, ya que pequeños errores en estos aspectos pueden comprometer el resultado final. En resumen, la impresión 3D es una gran manera de estudiar estructuras anatómicas y su ejecución requiere dedicación y paciencia para obtener los mejores resultados. Desde el punto de vista de la docencia, este enfoque de aprendizaje basado en la resolución de problemas permite comprender la segmentación y visualización de imágenes de manera directa.

Posteriormente a la ejecución de este proyecto, los resultados de la segmentación se pasaron a una impresora de resina con la cual fue posible visualizar más claramente los bypasses, gracias a los detalles que no se pudieron capturar por medio de la

impresora de filamento. Esto ayuda también a subrayar las ventajas y desventajas de cada técnica de impresión.

### Referencias

1. Glasser, O. (1934). Wilhelm Conrad Röntgen and the Early History of the Roentgen Rays. Charles C. Thomas.
2. Mould, R. F. (1995). Radiology at the Turn of the Century. *The British Journal of Radiology*, 68(812), 1193-1214.
3. Kevles, B. H. (1997). *Naked to the Bone: Medical Imaging in the Twentieth Century*. Rutgers University Press.
4. Primer ECG
5. Waller, A. D. (1887). A Demonstration on Man of Electromotive Changes accompanying the Heart's Beat. *Journal of Physiology*, 8(5), 229-234.



*Figura 3 Impresión 3D en alta resolución empleando una impresora de resina de alta calidad*

6. Einthoven, W. (1901). *Un nouveau galvanomètre*. Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles, 6, 625-633
7. Fye, W. B. (1994). A History of the Origin, Evolution, and Impact of Electrocardiography. The American Journal of Cardiology, 73(13), 937-949.
8. Hull, C. W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. U.S. Patent No. 4,575,330.
9. Cima, M. J., Sachs, E., & Yoo, J. (1994). Three-dimensional printing techniques for tissue engineering applications. Biomaterials, 15(6), 409-415.
10. Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Kobligk, H., et al. (2010). *3D printing based on imaging data: Review of medical applications*. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 5(4), 335-341.
11. Mogali, S. R., & Gurung, S. B. (2021). Three-dimensional printing in medical education: A review of the current status and future perspectives. Anatomical Sciences Education, 14(5), 669-685.
12. Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Kobligk, H., et al. (2010). *3D printing based on imaging data: Review of medical applications*. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 5(4), 335-341.
13. Bartlett, H. L., Smith, M. T., & Aktas, A. (2020). *Medical 3D printing and its impact on healthcare*. Journal of 3D Printing in Medicine, 4(3), 125-136.
14. Ventola, C. L. (2014). Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. Pharmacy and Therapeutics, 39(10), 704-711.
15. Giannopoulos, A. A., Steigner, M. L., George, E., et al. (2016). *Cardiothoracic applications of 3D printing*. JACC: Cardiovascular Imaging, 9(11), 1287-1303.
16. Marro, A., Bandukwala, T., & Mak, W. (2016). Three-dimensional printing and medical imaging: A review of the methods and applications. Current Problems in Diagnostic Radiology, 45(1), 2-9.
17. Ciobotaru, V.; Tadros, V.-X.; Batistella, M.; Maupas, E.; Gallet, R.; Decante, B.; Leuret, E.; Gerardin, B.; Hascoet, S. 3D-Printing to Plan Complex Transcatheter Paravalvular Leaks Closure. J. Clin. Med. 2022, 11,
18. 4758. <https://doi.org/10.3390/>
19. Otton JM, Birbara NS, Hussain T, Greil G, Foley TA, Pather N. 3D printing from cardiovascular CT: a practical guide and review. Cardiovasc Diagn Ther 2017;7(5):507-526. doi: 10.21037/cdt.2017.01.12
20. Bertolini, M.; Rossoni, M.;Colombo, G. Operative Workflow from CT to 3D Printing of the Heart:Opportunities and Challenges. Bioengineering 2021, 8, 130. <https://doi.org/10.3390/>