
Diseño y fabricación de un modelo 3D para planificación quirúrgica en cardiopatías congénitas

Hellen Ana Gabriela Castillo Méndez



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de un modelo 3D para planificación
quirúrgica en cardiopatías congénitas**

Trabajo de graduación presentado por Hellen Ana Gabriela Castillo
Méndez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Biomédica

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de un modelo 3D para planificación
quirúrgica en cardiopatías congénitas**

Trabajo de graduación presentado por Hellen Ana Gabriela Castillo
Méndez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Biomédica

Guatemala,

2024

Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. José Andrés Leal Ordóñez

Tribunal Examinador:

(f) 
M. Sc. José Andrés Leal Ordóñez

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de enero de 2024

El campo de la medicina siempre ha sido mi mayor pasión, pero sentía que aún había un mundo de posibilidades por explorar. Fue entonces cuando decidí combinar mi amor por la medicina con los conocimientos tecnológicos que la ingeniería biomédica aporta al campo de la salud. Durante mi práctica en la empresa Cella Medical Solutions, tuve la invaluable oportunidad de presenciar de primera mano cómo la convergencia entre la medicina y la tecnología puede generar avances sorprendentes que transforman la calidad de vida de las personas.

Este inspirador encuentro con la intersección de la medicina y la tecnología fue lo que me motivó a emprender este apasionante proyecto de tesis. Opté por enfocarme en el campo de la cardiología, una disciplina que siempre ha ocupado un lugar especial en mi corazón. La posibilidad de unir la cirugía cardiovascular con la tecnología resulta verdaderamente fascinante para mí, ya que esta convergencia abre nuevas perspectivas y desafíos que constantemente me impulsan a adquirir nuevos conocimientos y habilidades. Mi objetivo es contribuir de manera significativa a la mejora de la atención médica y la calidad de vida de los pacientes, mediante la aplicación de soluciones innovadoras y la exploración de nuevos horizontes en el ámbito de la salud.

El largo y desafiante camino que he recorrido hasta aquí no habría sido posible sin la inestimable ayuda divina de mi amado Dios, quien me ha otorgado la inteligencia y la fuerza necesarias para adentrarme en este nuevo mundo de la ingeniería biomédica, el cual, sin duda, ha estado lleno de bendiciones ilimitadas. Además, tengo la inmensa fortuna de contar con una familia excepcional que ha sido mi constante motivación y apoyo en todos mis proyectos. Mi madre y mi hermana son mis pilares fundamentales, y debo recordar con cariño a mi abuelita y a mi querida Dorita, quienes, aunque ya se encuentran en un lugar mejor, desempeñaron un papel crucial en mi desarrollo como persona. Por supuesto, no puede faltar el agradecimiento a mi hermano Abdul, quien ha sido mi héroe y un apoyo invaluable en mi vida. Sin su constante respaldo y compañía, muchos de mis logros no habrían sido posibles.

No obstante, las bendiciones no terminan ahí; cuento con una familia excepcional que siempre está dispuesta a respaldarme en cada nueva aventura que emprendo. Especialmente, quiero destacar a mis primos César, Henry, Vinicio, Jacky, Lore, Cris, así como a mis ado-

rables sobrinos. Mis amigos cercanos han contribuido de manera inestimable en cada uno de mis proyectos, brindando su apoyo incondicional, como Liz, Elenita, Estephan, Estefany, Karlita, Boniche, Nicole, Eidy y Mario. Además, no puedo pasar por alto el inestimable respaldo de mis valiosos compañeros de trabajo, cuya colaboración ha sido esencial para alcanzar mis metas profesionales. En resumen, cada uno de estos seres queridos y colaboradores ha sido un pilar fundamental en mi camino, y estoy infinitamente agradecida por su presencia constante en mi vida.

Además, es fundamental expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad del Valle de Guatemala, que me brindó la invaluable oportunidad de recibir una formación de excelencia en el campo de la ingeniería biomédica. Quiero reconocer el papel fundamental del Ingeniero Carlos Esquit, quien me alentó a embarcarme en esta carrera y ha sido mi mayor respaldo a lo largo de todos estos años en esta prestigiosa institución académica.

También deseo destacar el incansable trabajo de Lésly Gómez, cuya dedicación hacia todos los estudiantes ha simplificado enormemente nuestra experiencia educativa. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a los destacados profesores que han guiado mi proceso de aprendizaje con notoria paciencia y dedicación. En particular, deseo reconocer y agradecer a Dorval Carías, Andrés Viau, Luis Rivera, Miguel Zea, Andrés Monterroso, Regina Fanjul, Marvin González, Pablo Mazariegos y Estuardo Mancio, así como a Lic. Anabella Molina y Lic. William Arredondo. Todos ellos han sido una fuente constante de inspiración y motivación a través de su apasionada labor educativa. Asimismo, deseo expresar mi sincero reconocimiento a José Andrés Leal por su minuciosa revisión de este proyecto y sus invaluable contribuciones, su dedicación y perspicacia en la revisión han enriquecido significativamente la calidad de este trabajo. Agradecimiento sincero también a Dulce Chacón por su apoyo en la creación del vídeo para la presentación final.

Indudablemente, no puedo subestimar el papel esencial que desempeñó Cella Medical Solutions en mi formación. Esta empresa no solo inspiró mi proyecto, sino que también proporcionó un apoyo inestimable a lo largo de mi desarrollo académico y profesional. Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Miguel Rodríguez, quien ha sido un pilar fundamental en este proyecto, brindando su valioso apoyo y realizando contribuciones significativas, su compromiso y dedicación hacia este trabajo han sido excepcionales y han tenido un impacto notable en su desarrollo y éxito. Además, agradezco a Darío García por abrirme las puertas de Cella y permitirme adquirir nuevos conocimientos en esta extraordinaria empresa, así como a David Manso, Miguel Ángel Navarro, Olga Aldykevych, y Antonio Marín, por su orientación en este proyecto. Reconozco y aprecio profundamente a todo el equipo de esta admirable empresa, que siempre ha estado dispuesto a brindar su apoyo de manera inquebrantable. Sin lugar a dudas, su contribución ha sido fundamental en mi trayectoria.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los Cirujanos de la Unidad de Cirugía Cardíaca de Adultos de UNICAR por su invaluable apoyo en la evaluación y análisis del proyecto, sus comentarios y opiniones, como expertos en cirugía cardiovascular, son extraordinariamente relevantes y significativos. En particular, deseo extender mi gratitud al Dr. Juan Carlos Sánchez, quien ha sido un apoyo constante desde mis días como estudiante de quinto año de medicina hasta este momento en que culmino esta etapa de mi formación. Su orientación y respaldo han sido fundamentales en este proceso y siempre estaré agradecido por su generosidad y dedicación.

Prefacio	IV
Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	X
Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Alcance	8
6. Marco teórico	9
6.1. Anatomía cardíaca	9
6.2. Fisiología cardíaca	11
6.3. Cardiopatías congénitas	13
6.4. Métodos diagnósticos	14
6.5. Corregistro de imágenes médicas	16
6.6. Segmentación de imágenes médicas	17
6.7. Tecnología 3D	18
6.8. Planificación quirúrgica	21

7. Metodología	23
7.1. Selección de paciente y obtención de imágenes médicas	23
7.2. Corregistro de imágenes médicas	26
7.3. Segmentación de imágenes médicas	28
7.4. Impresión 3D del modelo anatómico del paciente	29
8. Resultados	32
8.1. Modelo 3D para planificación quirúrgica de una comunicación interauricular (CIA)	32
8.1.1. Selección de paciente con cardiopatía congénita	32
8.1.2. Corregistro de imágenes médicas	34
8.1.3. Segmentación de estructuras anatómicas	34
8.2. Impresión de Modelo 3D	43
8.3. Presentación de Modelo 3D a cirujanos cardiovasculares de UNICAR	46
8.4. Implementación de Modelos 3D en la Planificación quirúrgica y cirugía	47
9. Discusión	50
9.1. Descripción del Modelo 3D	50
9.2. Aplicación clínica y resultados	52
9.3. Limitaciones y posibilidades futuras	54
10. Conclusiones	56
11. Recomendaciones	57
12. Bibliografía	59
13. Glosario	62

1.	Corazón vista anterior del corte frontal [13]	10
2.	Corazón vista posterior externa [13]	10
3.	Acontecimientos del ciclo cardíaco [14]	12
4.	Diagrama de la circulación cardíaca [14]	12
5.	Estadísticas de cardiopatías congénitas según la OMS [15]	13
6.	Principales cardiopatías congénitas [15]	14
7.	Tomografía computarizada cardíaca (TCC). 1. Reconstrucción MIP, muestra origen de la arteria descendente anterior (flechas). 2. Reconstrucción de volumen (VR) del mismo paciente. 3. Corte axial que demuestra origen de la arteria coronaria derecha desde el seno coronario izquierdo. 4. Reconstrucción MIP muestra origen de la circunfleja [17]	15
8.	Resonancia magnética cardíaca (RMC). 1 y 2 imágenes de diástole y sístole, respectivamente. En sístole se identifica acinesia inferoapical. 3 y 4 imágenes de diástole y sístole, respectivamente. En sístole se identifica área discinética. (AI) Aurícula izquierda, (VI) Ventrículo izquierdo [18]	16
9.	Segmentación de imágenes corregistradas: 1. Vista axial de imagen médica en la que se aprecia la segmentación de algunas estructuras anatómicas. 2. Modelo 3D generado a partir de la segmentación realizada. 3. Vista coronal de la imagen médica en la que se aprecia la segmentación de algunas estructuras anatómicas. 4. Vista sagital de la imagen médica en la que se aprecia la segmentación de algunas estructuras anatómicas. (Segmentación proporcionada por Cella Medical Solutions)	17
10.	Modelos anatómicos de patología hepática impresos en 3D por la empresa Cella Medical Solutions [22]	18
11.	Modelo 3D en realidad virtual, desarrollado por Cella Medical Solutions, se emplea como guía durante procedimientos quirúrgicos. [22]	19
12.	Modelo 3D en realidad aumentada, desarrollado por Cella Medical Solutions, se emplea como guía durante procedimientos quirúrgicos. [22]	20
13.	Modelo 3D impreso en Cella Medical Solutions para Guiado quirúrgico: se acomoda a la anatomía del paciente durante la intervención para dirigir la acción sobre la patología con precisión [22]	22

14.	1. Corazón normal (RA. Aurícula derecha, LA. Aurícula izquierda, RV. Ventrículo derecho, LV. Ventrículo Izquierdo, SVC. Vena cava superior, IVC. Vena cava inferior, MPA. Arteria pulmonar principal, Ao. Aorta, TV. Válvula tricúspide, MV. Válvula mitral, PV. Válvula pulmonar, AoV. Válvula aórtica). 2. Corazón con CIA. 3. Corazón con Drenaje venoso anómalo total. [28]	24
15.	1. Imagen de resonancia magnética cardíaca (RMC). 2. Imagen de tomografía computada cardíaca (TCC) [30]	25
16.	1. Imagen de resonancia magnética cardíaca (RMC), 2. Imagen de tomografía computarizada cardíaca (TCC), que serán corregistradas	27
17.	Fusión de imágenes de TCC y RMC	27
18.	Imagen obtenida después de hacer el correregistro de TCC Y RMC.	27
19.	Proceso de segmentación en 3D Slicer: el área roja es el delineado realizado a la estructura cardíaca desesada, para obtener el modelo 3D, en este caso de la aurícula izquierda	28
20.	Procesamiento final para impresión 3D: 1.Modelo final texturizado. 2. Visualización de pieza en formato Stereolithography (STL) previo a impresión 3D, para colocación de soportes	29
21.	Proceso de impresión del miocardio en PLA con impresora Prusa con una duración de 18 horas 8 minutos	31
22.	Tomografía computarizada cardíaca [30]	33
23.	Resonancia magnética cardíaca [30]	33
24.	Distribución de los planos anatómicos a la izquierda [34], Imágenes de los planos axial o transversal, sagital y coronal en formato DICOM a la derecha	34
25.	Segmentación aurícula derecha. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	35
26.	Segmentación aurícula izquierda. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	35
27.	Segmentación miocardio. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	36
28.	Segmentación ventrículo derecho. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	36
29.	Segmentación ventrículo izquierdo. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	37
30.	Segmentación vasculatura arterial. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	38
31.	Segmentación vasculatura venosa. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	38
32.	Segmentación venas pulmonares. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	39
33.	Segmentación arteria pulmonar. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	39
34.	Segmentación de comunicación interauricular. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	40
35.	Segmentación de comunicación con drenaje venoso pulmonar nómalo. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	40

36. Segmentación de drenaje venoso pulmonar anómalo. 1. Imagen médica corre- gistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado	41
37. Comunicación interauricular (1. CIA resaltada en amarillo en imagen DICOM vista axial, 2. CIA resaltada en amarillo modelo 3D obtenido a partir de la segmentación)	41
38. Segmentación Vista 3D (1. Arteria pulmonar, 2. Vasculatua arterial, 3. Au- rícula izquierda con defectos congénitos, 4. Aurículas derecha e izquierda, conectadas por la CIA, 5. Ventrículo derecho e izquierdo, 6. Miocardio, 7. Vista anterolateral derecha, 8. Vista posterolateral derecha)	42
39. 1. Miocardio vista superior, 2 Miocardio vista posterior	43
40. Vasculatura con soportes	43
41. Vasculatura después de retirar los soportes	44
42. Piezas anatómicas impresas, 1. Vasculatua arterial, 2. Arteria pulmonar, 3. Aurícula derecha y vasculatura venosa, 4. Ventrículo derecho, 5. Aurícula iz- quierda con defecto cardíaco: drenaje venoso pulmonar anómalo, 6. Miocardio vista superior, 7. Miocardio dividido en tres piezas para ensamblar, 8. Venas pulmonares, 9. Ventrículo izquierdo, 10. Aurículas derecha e izquierda con defectos cardíacos: Comunicacion interauricular, Comunicación de auricula a arteria pulmonar.	44
43. Aurículas derecha e izquierda con defectos cardíacos: Comunicacion interauri- cular (blanco), Comunicación de auricula a arteria pulmonar (amarillo)	45
44. Auriculas izquierda con defecto cardíaco: drenaje venoso pulmonar anómalo (amarillo y azul)	45
45. 1 y 2 Explicación acerca del porceso para elaboración del modelo, funcional- idad y beneficios de su uso. 3 y 4 Cirujanos evaluando las piezas del modelo	46
46. 1 Cirujanos discutiendo las piezas del modelo. 2 y 3 Armado del modelo 3D. 4 Cirujano ofrece sus opiniones sobre el modelo y proporciona sugerencias que podrían ser útiles para la planificación quirúrgica.	47
47. 1. Presentación de un modelo 3D abdominal. 2. Cirujano observando el modelo en realidad aumentada. 3. Cirujano utilizando el modelo para explicar oómo deben colocarse los trocares durante la cirugía	48
48. 1. Ingeniero biomédico de Cella Medical Solutions, colocando la pantalla para visualizar el modelo virtual durante la cirugía. 2. Paciente en la camilla con las marcar guía para situar los trócares del robot quirúrgico. 3. Visualización del modelo en realidad aumentada	48
49. 1. Posicionamiento de trócares en el paciente, visualizados en realidad aumen- tada. 2. Posicionamiento del modelo en realidad aumentada sobre el paciente para guía quirúrgica. 3. Uso de modelo virtual durante la cirugía	49
50. Imagen TC vrs Modelo 3D (1. Planificación quirúrgica en el pasado, 2. Pla- nificación quirúrgica actual)	52
51. Modelo virtual (Vista de defectos congénitos) [22]	53

Lista de cuadros

1. Cálculo de filamento usado en gramos (g) y pulgadas (in) y el tiempo de impresión para cada pieza	30
--	----

El objetivo del proyecto fue diseñar y fabricar un modelo 3D anatómicamente preciso de un corazón con cardiopatía congénita, con el propósito de mejorar la planificación quirúrgica en procedimientos cardiovasculares. Para lograrlo, se siguieron etapas específicas que incluyeron la selección de un paciente con cualquier tipo de cardiopatía congénita que requería cirugía. Las imágenes médicas de tomografía cardíaca y resonancia magnética cardíaca del paciente, en formato DICOM, fueron proporcionadas por la empresa Cella Medical Solutions y corregistradas para su procesamiento en el modelo 3D.

Posteriormente, se utilizó el software gratuito 3D Slicer, reconocido por su especialización en la visualización y segmentación de datos médicos en formato DICOM. Esta herramienta fue esencial para convertir las imágenes médicas en un modelo 3D detallado y preciso de la anatomía cardíaca y la cardiopatía presente. La versatilidad de 3D Slicer permitió un análisis exhaustivo de cada detalle anatómico. Además, se complementó el proceso con el software Blender, conocido por sus capacidades avanzadas de modelado 3D, para realizar ajustes y refinamientos, asegurando la máxima fidelidad anatómica. Esta combinación de herramientas permitió una representación excepcional del corazón afectado por la cardiopatía congénita, proporcionando una base sólida para la planificación quirúrgica y la educación médica en procedimientos cardiovasculares.

La impresión y ensamblaje del modelo 3D se llevaron a cabo con un enfoque meticuloso para garantizar la máxima precisión, siendo este proceso minuciosamente documentado para registrar cada etapa. Además, se documentó detalladamente el proceso de planificación quirúrgica, junto con la ejecución de una cirugía en la que se utilizó otro modelo 3D de un paciente con una patología diferente. El propósito de esta intervención fue resaltar la importancia y versatilidad de estos modelos en diversas situaciones clínicas. Es relevante mencionar que el modelo desarrollado en este proyecto fue presentado a cirujanos de UNICAR, quienes aportaron su valiosa perspectiva, identificando áreas de mejora y proporcionando información sobre cómo podrían emplear eficazmente el modelo en procedimientos futuros.

The goal of the project was to design and manufacture an anatomically accurate 3D model of a heart with congenital heart disease, with the purpose of enhancing surgical planning in cardiovascular procedures. To achieve this, specific stages were followed, including the selection of a patient with any type of congenital heart disease requiring surgery. The medical images of the patient's cardiac tomography and magnetic resonance imaging, in DICOM format, were provided by Cella Medical Solutions and co-registered for processing into the 3D model.

Subsequently, the free software 3D Slicer, known for its specialization in visualizing and segmenting medical data in DICOM format, was used. This tool was essential in converting the medical images into a detailed and precise 3D model of the cardiac anatomy and the existing heart condition. The versatility of 3D Slicer allowed for a comprehensive analysis of every anatomical detail. Additionally, the process was complemented by Blender software, renowned for its advanced 3D modeling capabilities, to make additional adjustments and refinements, ensuring maximum anatomical accuracy. This combination of tools enabled an exceptional representation of the heart affected by congenital heart disease, providing a strong foundation for surgical planning and medical education in cardiovascular procedures.

The printing and assembly of the 3D model were carried out with meticulous attention to ensure maximum precision, and this process was thoroughly documented to record each stage. Additionally, the surgical planning process was extensively documented, along with the execution of a surgery where another 3D model of a patient with a different condition was utilized. The purpose of this intervention was to emphasize the importance and versatility of these models in various clinical scenarios. It's worth noting that the model developed in this project was presented to UNICAR surgeons, who contributed their valuable insights, identifying areas for improvement and providing information on how they could effectively utilize the model in future procedures.

La importancia de la planificación quirúrgica precisa y la mejora de las técnicas en cirugía cardiovascular nunca ha sido más relevante que en la actualidad. Con un aumento significativo en la incidencia de enfermedades cardiovasculares en todo el mundo y un número considerable de cirugías cardíacas realizadas anualmente, la necesidad de abordar estas complejas patologías de manera más eficaz se ha vuelto primordial. Este desafío es aún más apremiante en el caso de defectos cardíacos congénitos, que afectan a un número significativo de recién nacidos y adultos que requieren procedimientos quirúrgicos especializados.

La utilización de modelos 3D, ya sea en forma impresa o virtual, se presenta como una herramienta innovadora y prometedora en la planificación de cirugías cardiovasculares. Estos modelos ofrecen a los cirujanos una visión tridimensional precisa de las estructuras anatómicas y patológicas, lo que facilita una comprensión más profunda y detallada. Esto, a su vez, permite una planificación quirúrgica más precisa, minimizando los tiempos de cirugía, reduciendo el riesgo de complicaciones y mejorando los resultados para los pacientes.

La tecnología de impresión 3D ha avanzado significativamente en los últimos años, y su aplicación en el campo de la medicina ha demostrado ser de gran utilidad en diversas especialidades. En el caso de la cirugía cardiovascular, los modelos 3D ofrecen la posibilidad de simular estrategias quirúrgicas, realizar una planificación detallada y, lo que es igualmente importante, comunicarse de manera efectiva con los pacientes, brindándoles una comprensión visual de su procedimiento. Este enfoque personalizado puede aumentar la confianza del paciente y mejorar la toma de decisiones compartida entre el equipo médico y el paciente.

La integración de modelos 3D en la planificación de cirugías cardiovasculares representa un avance significativo en la práctica médica, con el potencial de mejorar la eficiencia y la precisión de los procedimientos, reducir los riesgos para los pacientes y brindar una atención más completa y personalizada. Con la creciente incidencia de enfermedades cardiovasculares y defectos cardíacos congénitos, esta tecnología se presenta como un aliado invaluable en la lucha por proporcionar una atención médica de vanguardia y mejorar los resultados clínicos en el campo de la cirugía cardiovascular.

Este proyecto se centra en abordar la planificación quirúrgica para pacientes con cardiopatías congénitas mediante la creación de modelos 3D precisos del corazón afectado. El objetivo principal es diseñar y fabricar estos modelos 3D anatómicamente correctos. Para lograrlo, se describen los pasos detallados del proceso, desde la adquisición de imágenes médicas de pacientes hasta la segmentación y creación de los modelos 3D utilizando el software 3D Slicer. Además, se enfoca en la documentación exhaustiva del proceso y su aplicación en cirugías cardíacas reales. Este enfoque promete mejorar significativamente la precisión y la calidad de la planificación quirúrgica en el campo de las cardiopatías congénitas y la cirugía cardiovascular.

A lo largo de la historia, la cirugía ha evolucionado significativamente, transitando de procedimientos convencionales hacia técnicas más sofisticadas y precisas, como la cirugía endoscópica y robótica. Esta progresión no solo ha transformado la práctica quirúrgica, sino también ha impulsado avances en las técnicas diagnósticas. En la actualidad, los métodos de diagnóstico se han enriquecido con tecnologías de vanguardia, donde los estudios por imágenes, tales como la tomografía computarizada, la resonancia magnética y la tomografía por emisión de positrones, se han convertido en pilares fundamentales. Estos avances diagnósticos no solo han revolucionado la precisión y la detección temprana de afecciones médicas, sino que también han redefinido la planificación y ejecución de intervenciones quirúrgicas. La capacidad de estas técnicas de imágenes para ofrecer una visión detallada y tridimensional del cuerpo humano ha elevado el nivel de comprensión de la anatomía y las patologías, permitiendo a los profesionales médicos abordar casos con mayor exactitud y seguridad.^[1]

Desde hace varios años, profesionales de distintas disciplinas han contribuido con el desarrollo de nuevas técnicas que faciliten el trabajo de los cirujanos. Los modelos 3D se encuentran entre los avances tecnológicos más importantes para la medicina personalizada que permiten brindar tratamientos específicos a los pacientes a quienes se aplica. En la actualidad es posible que las imágenes médicas de los pacientes se materialicen a través de los modelos 3D, ya sea impresos o virtuales. El uso de estos biomodelos permite el estudio de las lesiones del paciente y la planificación quirúrgica avanzada, debido a que da la oportunidad al cirujano de realizar una simulación de la intervención que realizará.^[2]

Rubio, L. et al., describió la experiencia en la creación de modelos 3D aplicados a cardiología y cirugía cardíaca en el Hospital Universitario Cruces. Por medio de la revisión del tema y descripción de casos clínicos describió las aplicaciones de los modelos. Detalló el proceso de generación de los modelos y cada una de sus etapas. Concluyó indicando que la impresión de modelos 3D se puede aplicar a cualquier indicación que necesite de tratamiento personalizado. Resaltó que es un proceso laborioso que aporta información muy valiosa para elaborar una adecuada la planificación quirúrgica y requiere de la participación de un equipo multidisciplinario, pero que es una práctica con gran futuro.^[3]

Los modelos 3D son una tecnología innovadora, no solamente para el área de cirugía cardiovascular, sino que, para todas las demás especialidades quirúrgicas. El uso de los bio-modelos, pueden aplicarse a cualquier región anatómica que necesite de una cirugía. Gamez, A. et al., describió el proceso de planificación quirúrgica mediante el uso de modelos 3D para trasplante hepático en donante vivo adulto-adulto. Realizó un análisis de las dificultades y beneficios que representa el proceso y describió sus resultados. Concluyó expresando que el uso de la impresión de órganos 3D para planificación quirúrgica brinda la oportunidad de entender las relaciones espaciales entre las estructuras vasculares y biliares; además facilita la cirugía y permite minimizar complicaciones intraoperatorias. [4]

Debido a los múltiples beneficios que el uso de modelos 3D para planificación quirúrgica, han demostrado, existen varias empresas que se dedican a realizar este tipo de tecnología. Cella Medical Solutions, ubicada en Murcia, España, cuenta experiencia en elaboración de modelos 3D para planificación quirúrgica de procedimientos principalmente hepáticos, colorrectales, renales y pancreáticos. Aplica tecnologías avanzadas que permiten brindar un tratamiento personalizado al paciente, contribuyendo a disminuir los efectos adversos, complicaciones y tiempos de una cirugía. Contribuye a que el tratamiento quirúrgico de cada paciente se eficaz, preciso y seguro. [5]

Las enfermedades cardiovasculares son una de las principales causas de muerte en el mundo, siendo mayor su incidencia en países de América, donde la Organización Panamericana de la Salud estima 1.9 millones de muertes anuales por esta causa, sobrepasando al cáncer, la diabetes y las enfermedades respiratorias. [6] Los defectos cardíacos congénitos representan aproximadamente el 30 % de todas las anomalías congénitas con una prevalencia de 8 por cada 1,000 recién nacidos vivos. [7]

En el año 2020, 60 hospitales de España proporcionaron datos a la Sociedad Española de Cirugía Cardiovascular y Endovascular, que permitieron obtener datos estadísticos indicando que durante ese año se realizaron 27,017 intervenciones cardíacas en total, de éstas 17,880 fueron cirugías cardíacas mayores, de los cuales 16,271 fueron cirugías por enfermedades adquiridas y 1,609 por enfermedades congénitas; 15,534 procedimientos en total necesitaron circulación extracorpórea. [8]

Las anomalías congénitas son defectos en la estructura y función del órgano que lo presenta, se desarrollan durante el embarazo y pueden ser diagnosticadas, tanto en la etapa prenatal, durante el nacimiento o la infancia. La OMS determinó que las anomalías congénitas cardíacas representan el 5 % de las muertes neonatales y el 8 % de las muertes en el período postnatal en todo el mundo. Se estima que cada año se diagnostican anomalías congénitas graves en aproximadamente 3 millones de niños y de éstos 303,000 neonatos fallecen a las cuatro semanas de vida. [9]

Cuando un paciente presenta un defecto congénito para el cirujano cardiovascular es más difícil conocer la anatomía del paciente, por esta razón las imágenes médicas previas a un procedimiento cardíaco toman gran importancia. En los últimos años se ha desarrollado otra tecnología que permite materializar esas imágenes médicas y por medio de ellas obtener modelos 3D tanto impresos como virtuales que permiten llevar a cabo una planificación detallada de la cirugía que se realizará. [10]

La planificación quirúrgica mediante el uso de modelos 3D es cada vez más común. Actualmente, se realizan modelos 3D para el tratamiento de diversas patologías que requieren

un procedimiento quirúrgico. La planificación previa a la cirugía permite al cirujano consolidar los conocimientos de las técnicas quirúrgicas que utilizará durante la intervención y tener más seguridad al momento de aplicarlas, favoreciendo la reducción del tiempo quirúrgico y posibles iatrogenias. Se considera que el uso de modelos 3D personalizado de la anatomía del paciente permite perfeccionar o modificar los planes de intervención definidos previamente y mejorar la capacidad de respuesta ante alguna complicación. [11] Los modelos 3D también pueden ser utilizados de manera virtual, al igual que los modelos 3D impresos proveen valiosa información acerca de las características de los órganos y tejidos del cuerpo, así como de las patologías. [12]

La ingeniería biomédica es una profesión que entre sus múltiples aplicaciones tiene como objetivo utilizar la tecnología como herramienta para facilitar a los médicos el tratamiento de los pacientes. En este proyecto de graduación, se trabajará en colaboración con la empresa Cella Medical Solutions, que cuenta con 7 años de experiencia en la producción de modelos 3D para la planificación de diversas cirugías. Cella proporcionará imágenes de tomografía computarizada y resonancia magnética anonimizadas de un paciente con cardiopatía congénita. Estas imágenes se utilizarán para crear un modelo 3D impreso y virtual, el cual será revisado y validado por Cella.

La utilización de modelos 3D para la planificación de cirugías de cardiopatías congénitas ofrece numerosos beneficios. En Guatemala, actualmente no se utilizan modelos 3D en este campo, por lo que adquirir los conocimientos necesarios para desarrollar modelos 3D impresos y virtuales representa una oportunidad para implementar esta tecnología en el país. Estos modelos 3D no solo son útiles para la planificación quirúrgica de cardiopatías congénitas, sino que también pueden emplearse en otras patologías que requieran cirugía, así como en el entrenamiento de médicos residentes de cirugía.

4.1. Objetivo general

Diseñar y fabricar un modelo 3D de un corazón que presente una cardiopatía congénita para planificación quirúrgica.

4.2. Objetivos específicos

- Describir paso a paso el proceso de elaboración de un modelo 3D anatómicamente correcto para planificación quirúrgica.
- Seleccionar uno o dos pacientes con cardiopatía congénita y realizar el corregistro de imágenes de tomografía computarizada y resonancia magnética cardíaca de los pacientes elegidos.
- Elaborar el modelo 3D a partir de la segmentación de las imágenes médicas corregistradas con el software 3D Slicer.
- Imprimir, procesar y ensamblar el modelo 3D para entregarlo al cirujano.
- Documentar el proceso de planificación quirúrgica y cirugía cardíaca de un paciente donde se implemente el uso de modelos 3D anatómicamente correctos.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y fabricar un modelo 3D anatómicamente preciso de un corazón que presente una cardiopatía congénita específica con el propósito de utilizarlo en la planificación quirúrgica, aunque en este momento el modelo únicamente será una herramienta educativa y no se utilizará en una cirugía real. Para lograrlo, se lleva a cabo un proceso meticuloso que incluye la selección de pacientes con dicha afección, la adquisición de imágenes médicas de alta calidad, la segmentación de las estructuras cardíacas relevantes y la creación del modelo 3D. Este modelo impreso será una herramienta invaluable para analizar y planificar la intervención quirúrgica de manera más precisa, mejorando así la atención médica para pacientes con cardiopatías congénitas.

El proyecto también destaca la importancia de documentar todo el proceso, desde la planificación hasta la cirugía, donde se implementa el uso de estos modelos 3D anatómicamente correctos. Esta documentación no solo beneficia al equipo médico actual, sino que también contribuye al avance de la práctica médica y proporciona una referencia valiosa para futuros casos similares, mejorando así la calidad de la atención en el campo de la cirugía cardíaca congénita.

El modelo 3D diseñado y fabricado será de un corazón que presenta tres tipos de cardiopatías congénitas que son una comunicación interauricular, una comunicación de aurícula a drenaje venoso anómalo y un drenaje venoso anómalo, debido a que estas son las patologías que presenta el paciente seleccionado, se realiza el corregistro de imágenes médicas de tomografía computarizada cardíaca y resonancia magnética cardíaca, con las que fue diagnosticado. Se elaborará un modelo 3D a partir de las imágenes médicas corregistradas del paciente a través del uso del software 3D Slicer, con el que también se realizará la segmentación para obtener el modelo 3D, que se procesará, imprimirá y ensamblará.

Además se documentará el proceso de planificación quirúrgica y la cirugía de otro paciente en el que también se hizo uso de un modelo 3D con la finalidad de comprender la importancia y utilidad de estos modelos durante las intervenciones quirúrgicas. El modelo también será presentado a cirujanos cardiovasculares del país para su evaluación y obtención de sus valiosas opiniones.

6.1. Anatomía cardíaca

El **Corazón:** es un órgano relativamente pequeño, mide alrededor de 12 cm de largo, 9 cm en su punto más ancho y 6 cm de espesor, con un peso promedio de 250 g en mujeres adultas y de 300 g en hombres adultos (Figura 1 y 2) . El corazón se apoya en el **Diafragma:** cerca de la línea media de la cavidad torácica y se encuentra en el **Mediastino:** La pared cardíaca se divide en tres capas: el **Epicardio:** (capa externa), el **Miocardio:** (capa media) y el **Endocardio:** (capa interna). [13] Está formado por dos bombas separadas, a su vez, éstas son bombas bicamerales pulsátiles formadas por una aurícula y un ventrículo. Las dos aurículas reciben la sangre de los vasos que la traen de regreso al corazón, las venas, mientras que los ventrículos la eyectan desde el corazón hacia los vasos que la distribuyen, las arterias. [13]

La aurícula derecha (atrio derecho) recibe sangre de tres venas: la vena cava superior, la vena cava inferior y el seno coronario. La sangre pasa desde la aurícula derecha hacia el ventrículo derecho a través de una válvula, la válvula tricúspide, que posee tres valvas o cúspides. También se denomina válvula auriculoventricular o atrioventricular derecha. [13] [14] La aurícula izquierda (atrio izquierdo) forma la mayor parte de la base del corazón. Recibe sangre proveniente de los pulmones, por medio de cuatro venas pulmonares. La sangre pasa desde la aurícula izquierda al ventrículo izquierdo, a través de la válvula bicúspide, que posee dos valvas o cúspides. También se la llama válvula auriculoventricular o atrioventricular izquierda. [13] [14] Entre la aurícula derecha y la izquierda se encuentra un tabique delgado, denominado septum o **Tabique interauricular:** Una formación anatómica importante de este tabique es la fosa oval, depresión oval remanente del foramen ovale, una comunicación interauricular en el corazón fetal que normalmente se cierra luego del nacimiento. [13] [14]

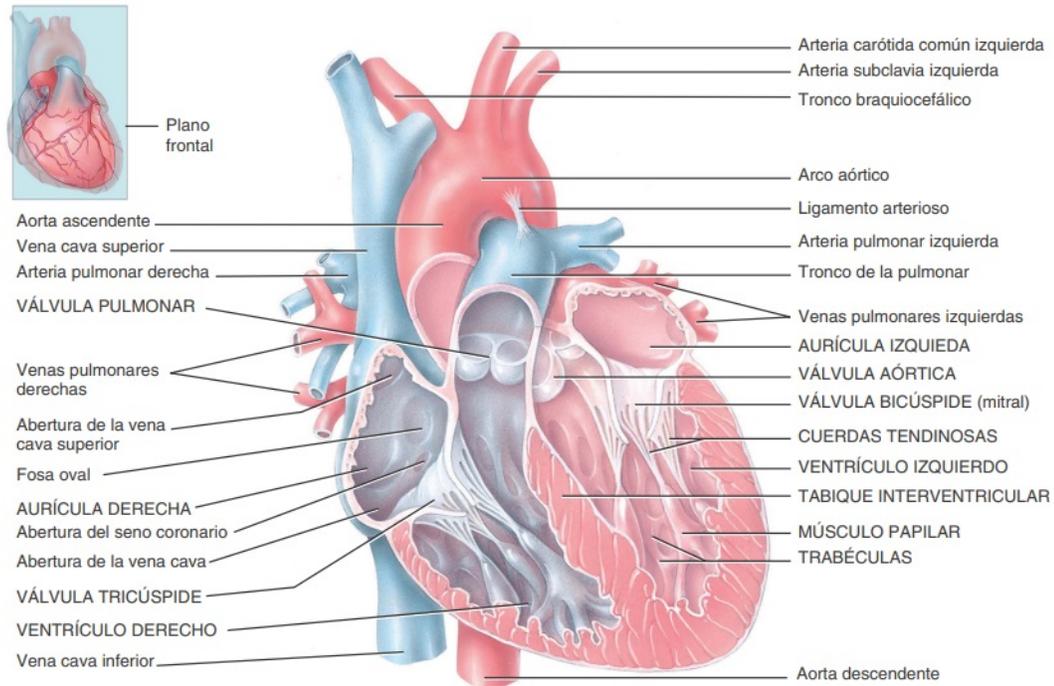


Figura 1: Corazón vista anterior del corte frontal 13

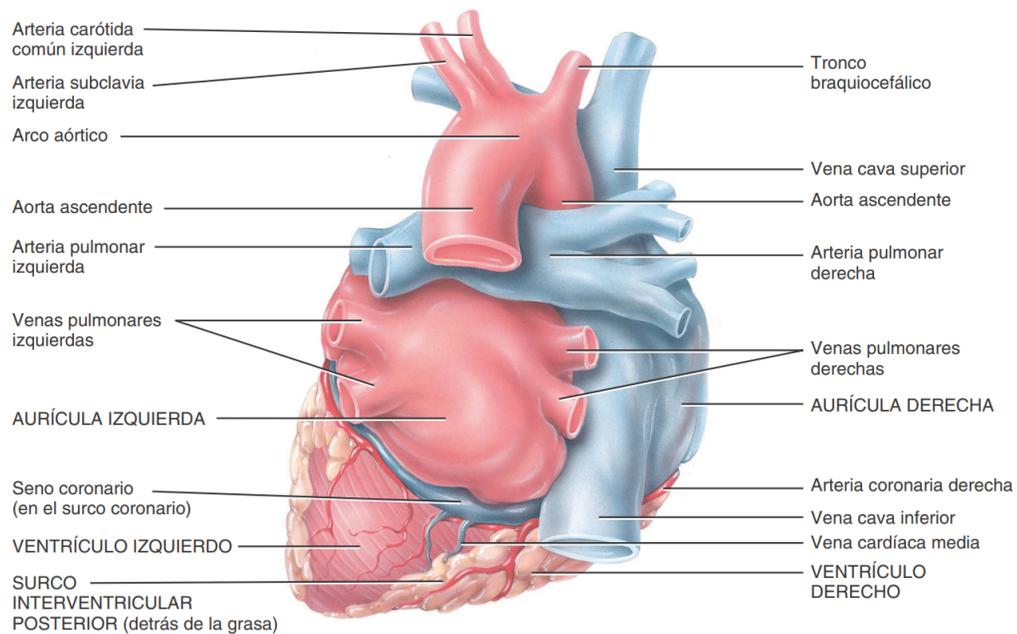


Figura 2: Corazón vista posterior externa 13

El ventrículo derecho forma la mayor parte de la cara anterior del corazón. En su interior, contiene una serie de relieves constituidos por haces de fibras musculares cardíacas denominadas trabéculas carnosas. Las cúspides o valvas de la válvula tricúspide se conectan mediante cuerdas de apariencia tendinosa, las Cuerdas tendinosas, que a su vez se conectan

con trabéculas cónicas denominadas músculos papilares. El ventrículo derecho se encuentra separado del ventrículo izquierdo por el septum o **Tabique interventricular**. La sangre pasa desde el ventrículo derecho, a través de la válvula pulmonar, hacia el tronco pulmonar, que se divide en las arterias pulmonares derecha e izquierda que transportan la sangre hacia los pulmones. [13] [14]

El ventrículo izquierdo tiene la pared más gruesa de las cuatro cámaras (un promedio de 10 a 15 mm) y forma el vértice o ápex del corazón. Al igual que el ventrículo derecho, contiene trabéculas carnosas y cuerdas tendinosas que conectan las valvas de la válvula mitral a los músculos papilares. La sangre pasa desde el ventrículo izquierdo, a través de la válvula aórtica, hacia la aorta ascendente. Parte de la sangre de la aorta ascendente se dirige hacia las arterias coronarias, que nacen de ella e irrigan el corazón. El resto de la sangre sigue su camino a través del arco o cayado aórtico y de la aorta descendente (aorta torácica y abdominal). Las ramas del **Cayado aórtico** y de la aorta descendente transportan la sangre hacia todo el organismo. [13] [14]

6.2. Fisiología cardíaca

Los fenómenos cardíacos que se producen desde el comienzo del latido cardíaco hasta el comienzo del siguiente se denominan **Ciclo cardíaco**. Cada ciclo es iniciado por la generación espontánea de un potencial de acción en el nódulo sinusal. Este nódulo está ubicado en la pared superolateral de la aurícula derecha, cerca del orificio de la vena cava superior. El potencial de acción viaja desde el nódulo sinusal hacia los ventrículos a través del haz de his. [14]

- **Diástole y sístole:**

El ciclo cardíaco se lleva a cabo en dos fases, un período de relajación denominada **Diástole**, y una fase de contracción denominada (Figura 3). La duración del ciclo cardíaco total, incluidas la diástole y la sístole, es el valor inverso de la frecuencia cardíaca. Es decir, si la frecuencia cardíaca es de 72 latidos/min, la duración del ciclo cardíaco es de $1/72$ min/latido, aproximadamente 0,0139 min por latido. [14]

- **Circulaciones pulmonar y sistémica**

Después del nacimiento, el corazón bombea sangre dentro de dos circuitos cerrados: la circulación sistémica y la circulación pulmonar. Los dos circuitos están dispuestos en serie: la salida de uno es la entrada del otro. El lado izquierdo del corazón es la bomba de la circulación sistémica; recibe sangre desde los pulmones, rica en oxígeno, roja brillante u oxigenada. [14]

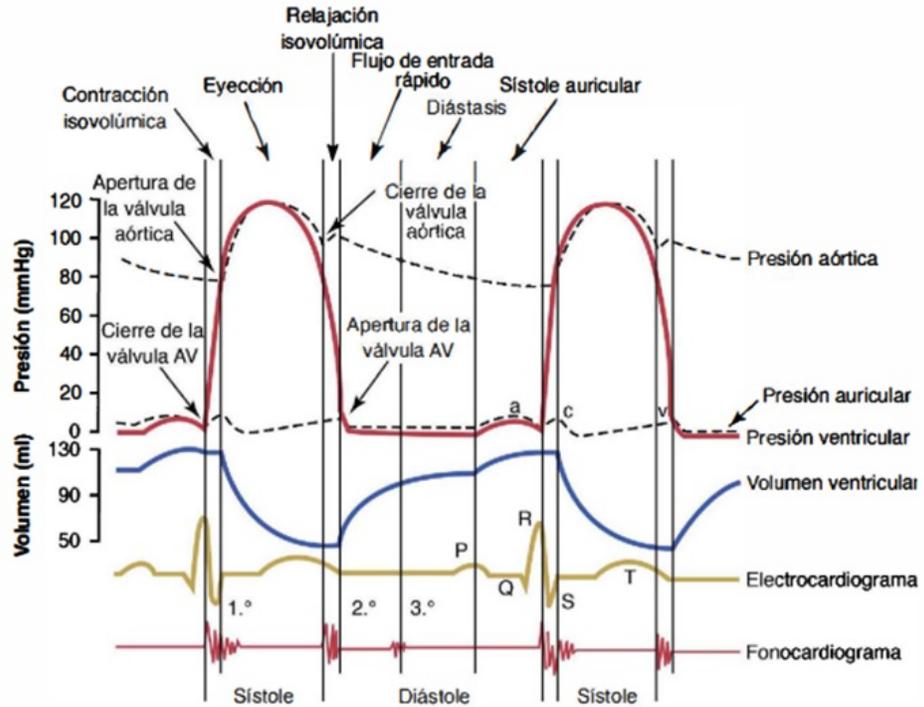


Figura 3: Acontecimientos del ciclo cardíaco [14]

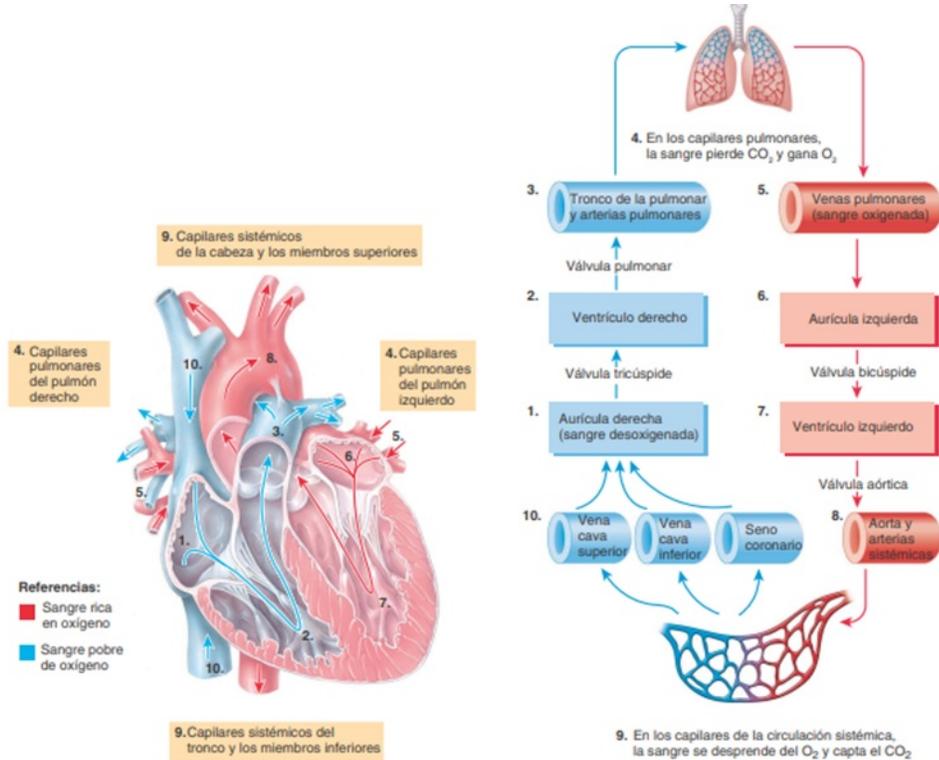


Figura 4: Diagrama de la circulación cardíaca [14]

El ventrículo izquierdo eyecta sangre hacia la aorta Desde la aorta, la sangre se va dividiendo en diferentes flujos e ingresa en arterias sistémicas cada vez más pequeñas que la transportan hacia todos los órganos, exceptuando los alvéolos pulmonares, que reciben sangre de la circulación pulmonar. En los tejidos sistémicos, las arterias originan arteriolas, vasos de menor diámetro que finalmente se ramifican en una red de capilares sistémicos. [13] [14] El intercambio de nutrientes y gases se produce a través de las finas paredes capilares. La sangre descarga el O₂ (oxígeno) y toma el CO₂ (dióxido de carbono). En la mayoría de los casos, la sangre circula por un solo capilar y luego entra en una vénula sistémica. Las vénulas transportan la sangre desoxigenada y se van uniendo para formar las venas sistémicas, de mayor tamaño.

Por último, la sangre retorna al corazón, hacia la aurícula derecha. El lado derecho del corazón es la bomba del circuito pulmonar; recibe la sangre desoxigenada, rojo oscuro, que retorna de la circulación sistémica. Esta sangre es eyectada por el ventrículo derecho y se dirige al tronco pulmonar, que se divide en las arterias pulmonares, las que transportan sangre a ambos pulmones. En los capilares pulmonares, la sangre libera el CO₂ y capta el O₂ inspirado. La sangre oxigenada fluye hacia las venas pulmonares y regresa a la aurícula izquierda, completando el circuito (Figura 4). [13] [14]

6.3. Cardiopatías congénitas

Las Anomalías congénitas son alteraciones estructurales presentes al momento del nacimiento. Pueden afectar cualquier parte del organismo siendo consideradas como severas aquellas de importancia médica o quirúrgica. Las anomalías congénitas pueden acompañarse de otras alteraciones anatómicas y funcionales, ya sea en forma independiente o asociadas. Muchas anomalías congénitas son causantes de muerte neonatal o discapacidades crónicas con gran impacto en los sistemas de salud y la sociedad. [15]



Figura 5: Estadísticas de cardiopatías congénitas según la OMS [15]

Dentro de estas anomalías congénitas, las cardiopatías son las más frecuentes y se estima una incidencia mundial de cuatro a nueve casos por cada mil nacidos vivos. Las cardiopatías congénitas tienen una causa multifactorial, algunos factores de riesgos son el antecedente familiar, enfermedades maternas como la diabetes, consumo de fármacos, infecciones, alte-

raciones del tejido conectivo, síndrome de Down o de Turner. La condición de severidad en las cardiopatías congénitas está relacionada con la falla de las resistencias pulmonares y del cierre del ductus arterioso, y con base en ésta se define un tratamiento médico con catéter o corrección quirúrgica. [15] En la mayoría de las cardiopatías congénitas existe una causa multifactorial y por el momento no conocida, siendo raros los casos ligados a una única mutación genética concreta. La posibilidad de transmisión a la descendencia o repetición de otro defecto congénito en un hijo es en general baja y oscila entre el 3% y el 5%, aunque puede variar significativamente en función del tipo concreto de cardiopatía (Figura 5). [15] Aparecen aproximadamente en el 1% de los recién nacidos vivos, existiendo un número casi incontable de cardiopatías congénitas diferentes, por lo que es necesario clasificarlas:

- Cortocircuitos izquierda derecha. Son aquellas en las que se produce un defecto en las estructuras cardíacas que separan la circulación sistémica de la pulmonar, produciéndose el paso de sangre de la primera a la segunda. En este grupo encontramos la comunicación interauricular, comunicación interventricular y el ductus arterioso persistente, entre otras (Figura 6).
- Lesiones obstructivas. Dificultan la salida de la sangre de las cavidades cardíacas. Entre ellas están las estenosis aórtica y pulmonar y la coartación aórtica. Cardiopatías congénitas cianóticas. Impiden la adecuada oxigenación de la sangre que llega a los tejidos, por lo que aparece cianosis (amoramamiento de labios o lechos ungueales). Las más frecuentes son la transposición de grandes vasos, la tetralogía de Fallot y la anomalía de Ebstein (Figura 6). [15]

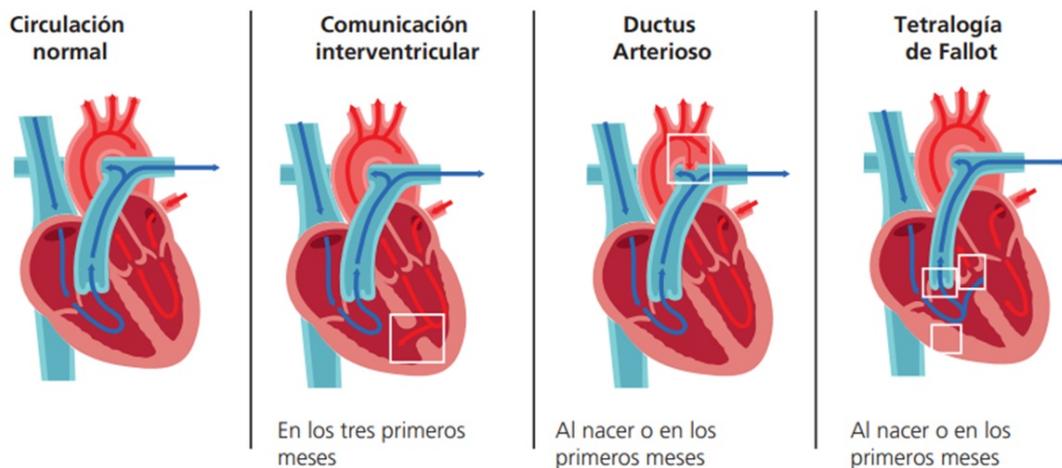


Figura 6: Principales cardiopatías congénitas [15]

6.4. Métodos diagnósticos

Durante las últimas dos décadas, se ha producido una revolución en las imágenes médicas, y se han desarrollado las técnicas de imagen 3D como la Tomografía Computarizada y

Resonancia Magnética. Estas imágenes se basan en la exposición secuencial de planos 2D en una pantalla de ordenador. Es decir, a pesar del potencial 3D que tienen las nuevas técnicas de imagen, el cardiólogo debe tratar de entender en un plano anatómico bidimensional la mejor representación posible de una estructura tridimensional mucho más compleja. [16] Evaluar el corazón con imágenes siempre ha sido un desafío tecnológico por su movimiento continuo. La posibilidad de hacerlo con TC aparece con los equipos multidetectores, por ser muy rápidos para obtener todo el volumen de información, y tener una alta resolución temporal y espacial. [17]

- Tomografía computarizada cardíaca (TCC)

La TCC (Figura 7) utiliza rayos X para la formación de imágenes. El paciente está acostado en la mesa del equipo y lo rodea una estructura en forma de anillo, que contiene el tubo que emite los rayos X y los detectores que los reciben en el lado contrario. La TC cardíaca porque permite evaluar la anatomía general para ver la disposición de las estructuras del corazón y de los puentes en relación al esternón. Así, el cirujano tendrá una idea más clara de cuál es el mejor abordaje para evitar dañar estas estructuras en la reintervención. Una distancia menor a 1 cm entre estas estructuras y el esternón es crítica y debe ser informada. En pacientes con válvulas protésicas, especialmente metálicas, la TC permite evaluar la anatomía, presencia de complicaciones como pseudoaneurismas, abscesos, obstrucción por formación de pannus, y también su grado de apertura y motilidad. [17]

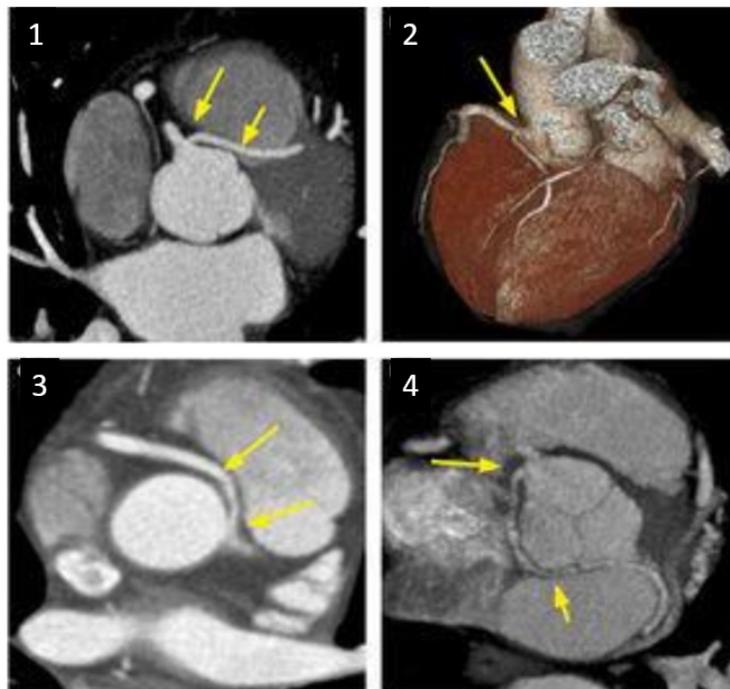


Figura 7: Tomografía computarizada cardíaca (TCC). 1. Reconstrucción MIP, demuestra origen de la arteria descendente anterior (flechas). 2. Reconstrucción de volumen (VR) del mismo paciente. 3. Corte axial que demuestra origen de la arteria coronaria derecha desde el seno coronario izquierdo. 4. Reconstrucción MIP muestra origen de la circunfleja [17]

- Resonancia magnética cardíaca (RMC) La RM (Figura 8) usa campos magnéticos y pulsos de radiofrecuencia para obtener las imágenes, y permite aplicar distintas secuencias para obtener información distinta. Una secuencia es una combinación particular de gradientes magnéticos y pulsos de radiofrecuencia. Estas combinaciones distintas permiten obtener información anatómica, funcional sobre motilidad y volúmenes cardíacos, medición de flujos y velocidad de la sangre, de perfusión miocárdica, y de realce tardío con gadolinio. [17]

La TCC y RMC son dos modalidades distintas de imágenes, con diferentes ventajas y desventajas, y por lo tanto la indicación de realizar un examen u otro depende de lo que se quiere evaluar, de la patología cardíaca que se está buscando o sospechando. [17]

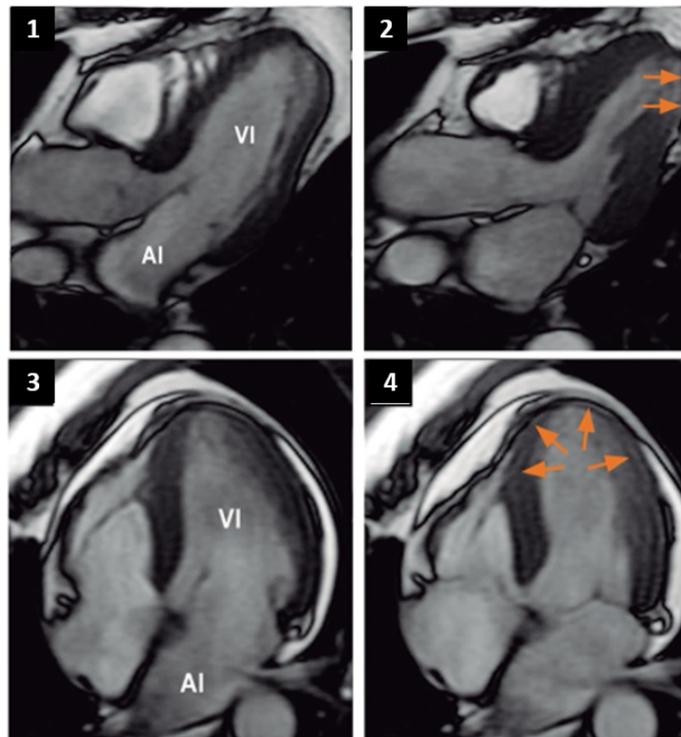


Figura 8: Resonancia magnética cardíaca (RMC). 1 y 2 imágenes de diástole y sístole, respectivamente. En sístole se identifica acinesia inferoapical. 3 y 4 imágenes de diástole y sístole, respectivamente. En sístole se identifica área discinética. (AI) Aurícula izquierda, (VI) Ventrículo izquierdo [18]

6.5. Corregistro de imágenes médicas

El corregistro de imágenes es el proceso de superposición de dos o más imágenes de la misma escena tomadas en diferentes momentos, desde diferentes puntos de vista y/o por diferentes escáneres. El proceso de corregistro alinea geométricamente dos imágenes: la imagen de referencia y la imagen móvil. Las diferencias que se introducen en las imágenes son debidas a las diferentes condiciones en las que se adquirieron las imágenes.

El registro de imágenes es un paso crucial en todas las tareas de análisis de imágenes en

las que la información final se obtiene de la combinación de varias fuentes de datos, como en la fusión de imágenes, la detección de cambios y la restauración de imágenes multicanal. Por lo general, se requiere registro en imágenes médicas, combinando datos de tomografía computarizada y resonancia magnética para obtener información más completa sobre el paciente, monitorear el crecimiento del tumor, verificar el tratamiento o comparar los datos del paciente con atlas anatómicos. [19]

6.6. Segmentación de imágenes médicas

La segmentación de imágenes, conocida también como contorno o anotación, constituye un proceso esencial para delinear áreas específicas en una imagen, usualmente correspondientes a estructuras anatómicas, lesiones u otros objetos dentro de la imagen. Este procedimiento es fundamental en la informática de imágenes médicas, ya que es vital para la visualización precisa de estructuras, mediciones de volumen, superficie y propiedades de forma, impresión 3D y la restricción del análisis a regiones específicas, entre otras aplicaciones. Aunque se puede realizar manualmente, con la iteración a través de los sectores de la imagen para trazar un contorno en el límite, es común el empleo de métodos semiautomáticos o totalmente automáticos. El módulo Editor de segmentos en 3D Slicer proporciona una amplia gama de métodos de segmentación para estas necesidades (Figura 9) [20].

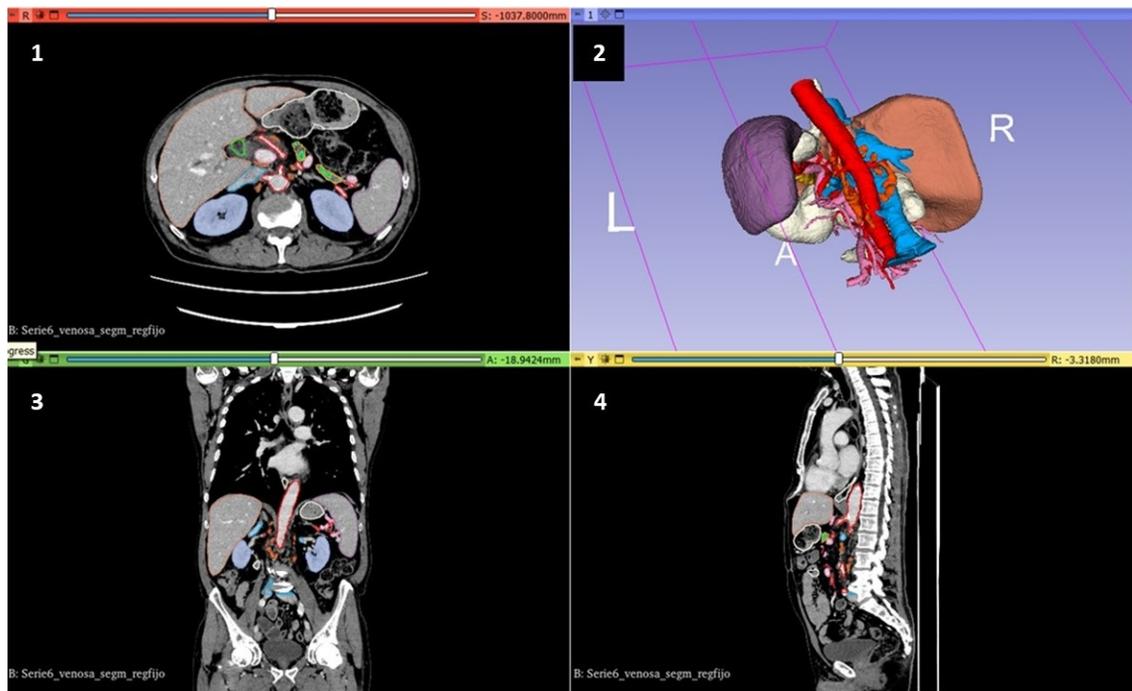


Figura 9: Segmentación de imágenes corregistradas: 1. Vista axial de imagen médica en la que se aprecia la segmentación de algunas estructuras anatómicas. 2. Modelo 3D generado a partir de la segmentación realizada. 3. Vista coronal de la imagen médica en la que se aprecia la segmentación de algunas estructuras anatómicas. 4. Vista sagital de la imagen médica en la que se aprecia la segmentación de algunas estructuras anatómicas. (Segmentación proporcionada por Cella Medical Solutions)

El proceso de segmentación de imágenes médicas en 3D Slicer implica una metodología avanzada para identificar y delimitar con precisión las distintas estructuras anatómicas presentes en imágenes obtenidas mediante tomografías computarizadas (TC), resonancias magnéticas (RM) u otros escáneres médicos. Esta técnica permite la separación detallada de regiones específicas de interés, como órganos, tejidos, tumores o vasos sanguíneos, mediante herramientas de procesamiento de imágenes. Utilizando algoritmos y técnicas especializadas, se crea una representación tridimensional precisa de estas estructuras, generando modelos virtuales que pueden ser manipulados y visualizados con alta fidelidad. La capacidad de segmentación en 3D Slicer resulta esencial en medicina al facilitar una comprensión detallada de la anatomía del paciente, permitiendo una planificación quirúrgica más precisa, seguimiento de patologías y diseño de tratamientos personalizados. Su versatilidad y capacidad para trabajar con diversos tipos de imágenes médicas lo convierten en una herramienta indispensable tanto para profesionales de la salud como para la investigación biomédica. [20]

6.7. Tecnología 3D

La llegada de la impresión 3D puede por primera vez resolver algunas de las limitaciones. Esta tecnología originada en la ingeniería y la industria aeronáutica ha empezado a encontrar aplicaciones en el mundo de la medicina. En este sentido, desde la introducción de la impresión 3D en el campo de las cardiopatías congénitas, una de las áreas de mayor potencial de desarrollo ha sido la educación médica. Generar un modelo 3D es un proceso complejo que requiere un equipo multidisciplinar de radiólogos, cardiólogos, pediatras e ingenieros. Estos especialistas deben trabajar juntos en cada uno de los siguientes pasos: adquisición de imágenes médicas, segmentación, diseño asistido por ordenador y, por último, impresión en 3D. [21]

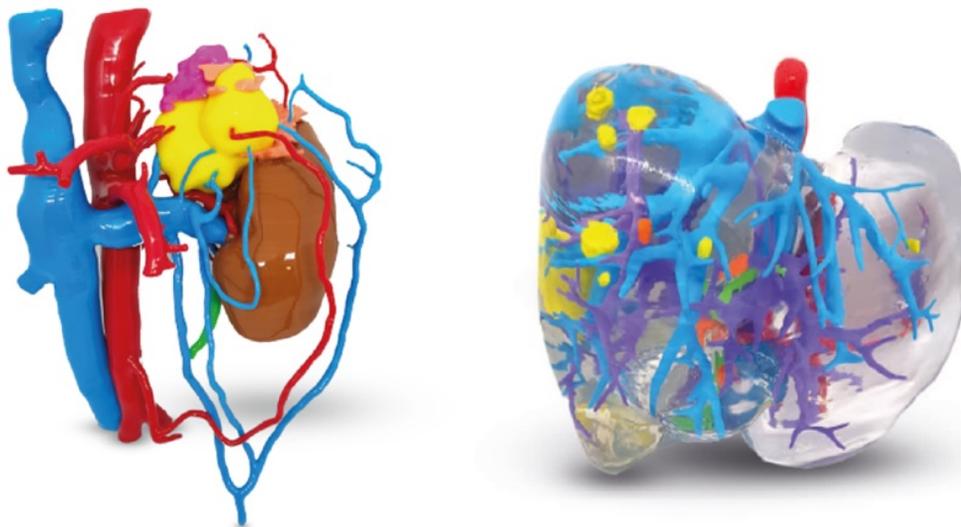


Figura 10: Modelos anatómicos de patología hepática impresos en 3D por la empresa Cella Medical Solutions [22]

- Métodos de impresión 3D:

La impresión 3D es una forma de fabricación aditiva en la que el objeto 3D se construye mediante la adición de material capa a capa sobre una superficie preexistente. Los métodos de impresión más comunes son el modelado por deposición fundida, el sinterizado selectivo por láser y la estereolitografía. Otros métodos de impresión 3D mucho más complejos utilizados para imprimir tejidos vivos quedan fuera del ámbito de esta disertación (Figura 10). [23]

- Materiales Para la impresión 3D de ecocardiografía, a menudo se prefieren los modelos huecos, en lugar de los modelos macizos. Los modelos basados en segmentación de sangre (blood pool) son generalmente modelos sólidos que representan el componente intravascular y proporcionan una excelente visualización de las estructuras vasculares extracardiacas y de las cámaras cardíacas. Sin embargo, al ser sólidos, no hay visión de la anatomía intracardiaca. En cambio, en los modelos huecos se elimina la cavidad ocupada por la sangre para permitir la inspección de las cavidades intracardiacas y las válvulas en detalle. [24]

El miocardio y las paredes de los vasos se crean e imprimen para permitir también la inspección extracardiaca. Las paredes pueden imprimirse intactas para permitir la simulación de la disección quirúrgica o con un plano de corte predeterminado para permitir una inspección más fácil. Los modelos de silicona pueden reproducir mejor las propiedades mecánicas específicas del tejido de las válvulas y crear una experiencia más realista para el usuario. Para ello, es necesario fabricar un molde negativo para rellenar el molde de silicona. El proceso paso a paso de la impresión de la válvula mitral se explica ampliamente en publicaciones anteriores. [24]

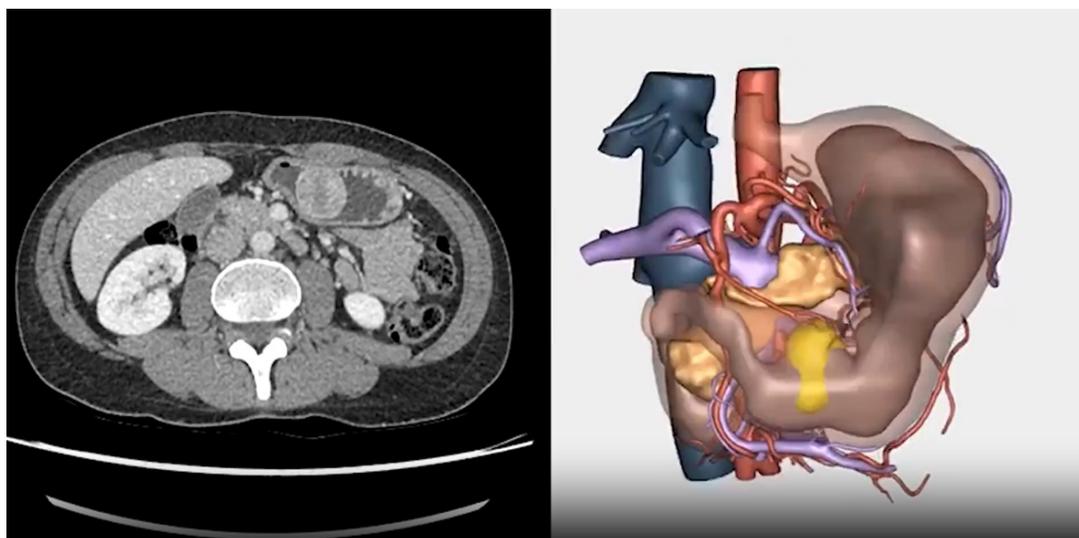


Figura 11: Modelo 3D en realidad virtual, desarrollado por Cella Medical Solutions, se emplea como guía durante procedimientos quirúrgicos. [22]

- La realidad virtual (RV) es un concepto que va más allá de la simple visualización de entornos simulados. Se trata de una experiencia completa que, a través de estímulos visuales y auditivos, sumerge al usuario en un ambiente generado por software, creando la sensación de estar presente en un espacio ficticio. Esta inmersión total y

envolvente, a menudo lograda mediante el uso de visores de realidad virtual, sensores de movimiento y controles, tiene como objetivo primordial engañar al cerebro para que perciba la realidad generada como auténtica. Inicialmente, el término "realidad virtual" se refería a cualquier entorno tridimensional explorado mediante un ordenador personal. Sin embargo, en la actualidad, su significado se ha ampliado para denotar experiencias altamente inmersivas y convincentes, donde los usuarios pueden interactuar con un mundo digital que simula la realidad. Este avance tecnológico ha trascendido los límites de la mera visualización, abriendo puertas a nuevas formas de aprendizaje, entrenamiento y entretenimiento (Figura 11). [25]

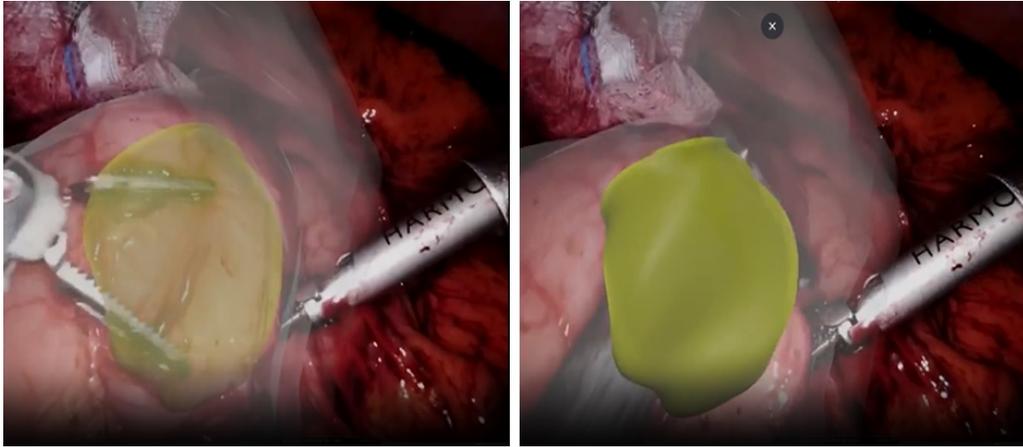


Figura 12: Modelo 3D en realidad aumentada, desarrollado por Cella Medical Solutions, se emplea como guía durante procedimientos quirúrgicos. [22]

- La realidad aumentada (RA) es una tecnología que integra elementos virtuales en el mundo real, enriqueciendo la percepción de la realidad física con información digital superpuesta. A diferencia de la realidad virtual, que sumerge completamente al usuario en un entorno simulado, la RA mejora la experiencia del mundo real mediante la superposición de gráficos, sonidos u otros elementos generados por computadora. Esta tecnología se ha convertido en una herramienta poderosa en diversos campos. Por ejemplo, en medicina, los profesionales pueden utilizar aplicaciones de RA para visualizar imágenes médicas superpuestas en tiempo real durante procedimientos quirúrgicos, lo que les permite ver órganos internos o estructuras anatómicas con precisión sobre la superficie del paciente. Esta capacidad mejora la comprensión del cirujano sobre la anatomía específica del paciente y puede contribuir a una cirugía más precisa y segura (Figura 12). [25]

En el contexto de la planificación quirúrgica, la RA ofrece a los cirujanos la capacidad de ver información médica crucial y datos anatómicos específicos superpuestos en el mundo real, facilitando una mejor comprensión de la anatomía del paciente y, en consecuencia, mejorando la precisión de las intervenciones quirúrgicas. Ambas tecnologías, la realidad virtual y la realidad aumentada, están en constante evolución y han revolucionado la forma en que percibimos y nos relacionamos con la información digital. Su influencia en la planificación quirúrgica se ha vuelto cada vez más relevante, [25]

6.8. Planificación quirúrgica

La planificación quirúrgica es un proceso integral que implica la preparación detallada y estratégica de una intervención quirúrgica antes de que ésta se lleve a cabo. Involucra la evaluación minuciosa de la anatomía del paciente, la comprensión de las afecciones patológicas y la identificación de posibles desafíos quirúrgicos. En este proceso participan varios profesionales de la salud, como cirujanos, radiólogos, técnicos en imágenes médicas y, en algunos casos, especialistas en modelos 3D. Para obtener información detallada de la anatomía del paciente y la patología que enfrenta, se recurre a una variedad de herramientas especializadas. Entre estas herramientas, destacan las imágenes de tomografía computarizada (TC) y resonancia magnética (RM), que ofrecen una visión minuciosa y detallada de la estructura anatómica, permitiendo identificar y analizar con precisión las posibles patologías presentes. Estas imágenes no solo revelan la disposición y forma de órganos y tejidos, sino que también facilitan la detección temprana de cualquier anomalía o enfermedad, siendo esenciales en el proceso de diagnóstico y planificación del tratamiento médico. [26] [27]

Las imágenes de TC y RM son fundamentales para la planificación quirúrgica, ya que ofrecen información crucial sobre la ubicación exacta de las estructuras anatómicas y las anomalías patológicas. Sin embargo, los modelos 3D han revolucionado este proceso al proporcionar representaciones tridimensionales y precisas de la anatomía del paciente y sus afecciones específicas. Las impresoras 3D pueden producir copias idénticas o a escala del corazón y los grandes vasos a partir de los datos obtenidos de la tomografía o la resonancia magnética. Los pacientes con cardiopatía congénita con relaciones anatómicas espaciales complejas son los más indicados para la impresión 3D, a partir de las imágenes obtenidas. Estos modelos permiten una visualización más detallada y tangible, lo que facilita la comprensión espacial de la anatomía y la patología, ayudando a los cirujanos a planificar con mayor precisión la estrategia quirúrgica (Figura 13). [26] [27]

La importancia de esta planificación para el cirujano es fundamental, ya que le permite visualizar con anticipación la anatomía del paciente, comprender mejor la patología específica y simular virtualmente la intervención quirúrgica. Esto reduce los riesgos durante la cirugía, aumenta la precisión de los procedimientos y optimiza los resultados, lo que beneficia directamente al paciente al disminuir posibles complicaciones, tiempos de operación y recuperación, y mejorar los resultados finales de la cirugía. En resumen, la planificación quirúrgica es una herramienta fundamental que aprovecha tecnologías avanzadas, como los modelos 3D, para mejorar significativamente la atención médica y la experiencia quirúrgica tanto para el cirujano como para el paciente. [26] [27]

Para determinar la anatomía intracardíaca, la impresión 3D ha demostrado un beneficio sobre todo en las cardiopatías estructurales del tronco cono, como la doble salida del ventrículo derecho, en la cual la comprensión precisa de la anatomía y las relaciones estructurales refleja el éxito de la reparación, por ejemplo, la relación de la comunicación interventricular con los grandes vasos (comunicación subpulmonar, comunicación subaórtica y no relacionada o doblemente relacionada). [26] [27]

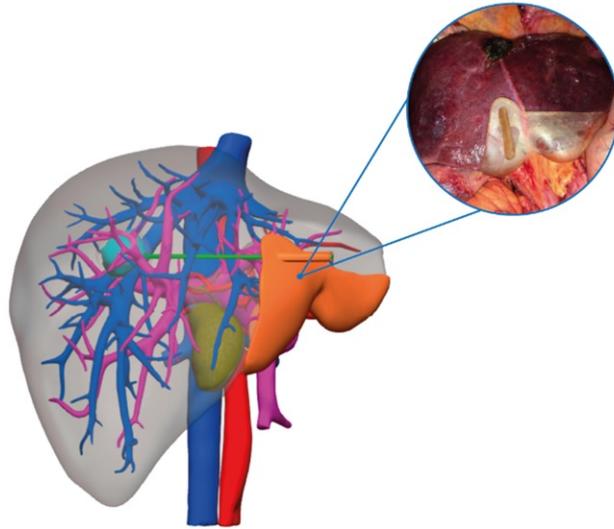


Figura 13: Modelo 3D impreso en Cella Medical Solutios para Guiado quirúrgico: se acomoda a la anatomía del paciente durante la intervención para dirigir la acción sobre la patología con precisión

22

Una cirugía es un procedimiento complejo que muchos médicos deben realizar cada día para salvar una vida o simplemente para mejorar la calidad de ésta. Previo a realizar una intervención quirúrgica, los cirujanos deben analizar al paciente a través de estudios que les permiten decidir qué procedimiento es el adecuado. Los estudios que con más frecuencia se utilizan para planificar una cirugía, son las imágenes de tomografía computarizada y resonancia magnética. Desde hace algunos años ha sido posible materializar las imágenes médicas, para convertirlas en modelos 3D que permiten a los cirujanos un contacto más estrecho con la patología que su paciente presenta.

La posibilidad de tener un modelo 3D personalizado para realizar una planificación quirúrgica adecuada, brinda múltiples beneficios tanto para el médico, como para el paciente. Es por esta razón que es importante indagar y aprender cuáles son los procedimientos necesarios para realizar un modelo 3D. Para la implementación de la metodología se llevarán a cabo 4 fases que permitirán el desarrollo de un modelo 3D para planificación quirúrgica.

7.1. Selección de paciente y obtención de imágenes médicas

A través de la empresa Cella Medical Solutions (Murcia, España), que ya cuenta con experiencia en la elaboración de modelos 3D para planificación quirúrgica y que tiene contacto con cirujanos cardiovasculares se seleccionó un paciente adulto de 42 años que presenta un defecto interauricular de aproximadamente 10 mm a nivel de fosa oval el cual es compatible con defecto tipo comunicación interauricular (CIA) Ostium Secundum y Drenaje venoso anómalo de venas del lobulo superior derecho (LSD) a vena cava superior (VCS). Drenaje venoso anómalo de valva lateromedial a (VLM) en VCS. Las venas del lóbulo inferior derecho (LID) drenan en aurícula izquierda. Defecto en la porción superior del tabique compatible con comunicación interauricular (CIA) tipo seno venoso superior (Figura 14).

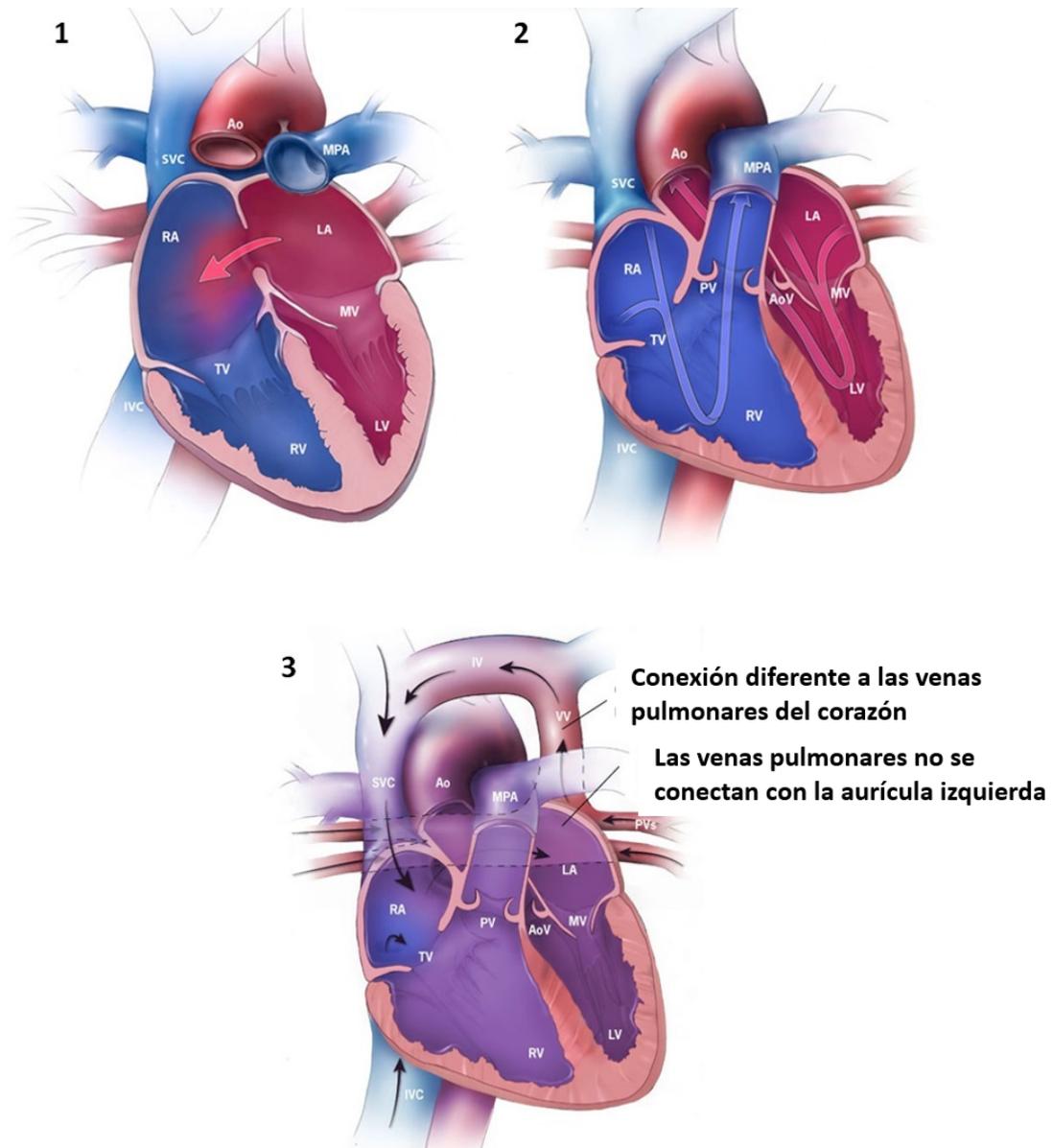


Figura 14: 1. Corazón normal (RA. Aurícula derecha, LA. Aurícula izquierda, RV. Ventriculo derecho, LV. Ventriculo Izquierdo, SVC. Vena cava superior, IVC. Vena cava inferior, MPA. Arteria pulmonar principal, Ao. Aorta, TV. Válvula tricúspide, MV. Válvula mitral, PV. Válvula pulmonar, AoV. Válvula aórtica). 2. Corazón con CIA. 3. Corazón con Drenaje venoso anómalo total. [28]

Las imágenes médicas del paciente se obtienen mediante la realización de tomografía computarizada cardíaca (TCC) y Resonancia magnética cardíaca (RMC). La tomografía computada cardíaca (TCC) es una técnica de diagnóstico médico que permite evaluar el corazón y las arterias coronarias utilizando rayos X. Lo que distingue a la TCC cardíaca de otros tipos de tomografías es su capacidad para sincronizar la adquisición de imágenes con el electrocardiograma (ECG) del paciente. Esto asegura que las imágenes se obtengan en momentos específicos del ciclo cardíaco, lo que es esencial para estudiar un órgano en

constante movimiento como el corazón. La TCC cardíaca se caracteriza por su alta resolución espacial y temporal. La resolución espacial se refiere a la capacidad de capturar detalles anatómicos con gran precisión, lo que es fundamental para visualizar las estructuras cardíacas y las arterias coronarias, incluso las más pequeñas. La resolución temporal se refiere a la capacidad de obtener imágenes nítidas a pesar del constante movimiento del corazón. Esta sincronización precisa entre la obtención de imágenes y el ciclo cardíaco es lo que distingue a la TCC cardíaca y la hace invaluable en el diagnóstico cardíaco (Figura 15). [29]

Para llevar a cabo un estudio de TCC cardíaca, se utilizan equipos de tomografía computada multidetectores con tecnología helicoidal. Estos equipos permiten adquirir una gran cantidad de datos en un corto período de tiempo, lo que es esencial para obtener imágenes de alta calidad incluso cuando el corazón late. Además, se requiere una frecuencia cardíaca regular y baja, generalmente por debajo de 60-65 latidos por minuto, así como la ausencia de contraindicaciones para el uso de medio de contraste y una función renal normal. En la modalidad helicoidal, el Gantry gira alrededor del paciente mientras la camilla sobre la que se encuentra el sujeto se desplaza, lo que permite obtener imágenes de manera más rápida. [29]

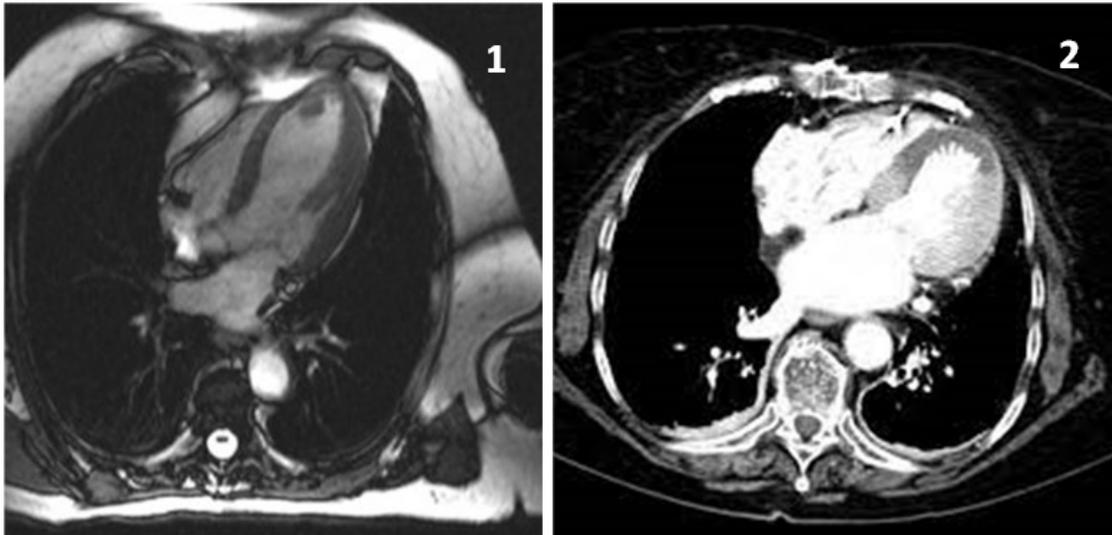


Figura 15: 1. Imagen de resonancia magnética cardíaca (RMC). 2. Imagen de tomografía computada cardíaca (TCC) [30]

Una vez que se obtiene el volumen de datos, se pueden realizar diversas técnicas de reconstrucción, como reconstrucciones multiplanares (MPR), proyecciones de máxima intensidad (MIP) y de volumen (VR). Estas técnicas ayudan a los médicos a interpretar el estudio y a visualizar las estructuras de manera más comprensible. La resonancia magnética cardíaca (RMC) tiene varias ventajas en la evaluación de las cardiopatías congénitas. Es libre de radiación, lo que la hace segura para su uso en pacientes pediátricos. Además, la RMC puede examinar el corazón en cualquier geometría y proporciona una evaluación altamente precisa y reproducible de los volúmenes y flujos ventriculares. Se considera el estándar de oro para la evaluación de los volúmenes y flujos ventriculares en las cardiopatías congénitas. [29] La RMC también es útil en la vigilancia longitudinal de los pacientes con cardiopatías congénitas, ya que a menudo requieren imágenes repetidas. La RMC se realiza utilizando

un escáner de resonancia magnética, que utiliza campos magnéticos y ondas de radio para generar imágenes detalladas del corazón. Durante el procedimiento, el paciente se acuesta en una camilla que se desliza dentro del escáner. Se pueden administrar agentes de contraste para mejorar la visualización de ciertas estructuras cardíacas. La RMC puede tomar imágenes en diferentes planos y secuencias para evaluar la anatomía y la función cardíaca. Posteriormente, las imágenes obtenidas se analizan y se generan informes detallados para ayudar en el diagnóstico y la planificación del tratamiento (Figura 15). [29]

7.2. Corregistro de imágenes médicas

Para realizar el corregistro las imágenes del paciente en formato DICOM se cargan al software 3D Slicer [20]. El corregistro en 3D Slicer busca alinear elementos en el espacio tridimensional, como imágenes y modelos. 3D Slicer ofrece muchas herramientas de corregistro como la manual, semiautomática y automática, en este caso se utilizaron herramientas automáticas de registro basadas en la intensidad para alinear las imágenes en escala de grises. Estos métodos requieren una alineación inicial precisa, usualmente con traslaciones menores a unos pocos centímetros y errores de rotación inferiores a 10-20 grados. El recorte de las imágenes para abarcar una región anatómica similar permitió un registro más ágil y robusto, realizándose con el módulo de recorte de volumen. [31]

A través de la cortadora 3D, se cargaron las imágenes y sus volúmenes correspondientes, utilizando el módulo de Registro General Elastix. Se seleccionaron el volumen fijo y el volumen en movimiento, eligiendo ajustes predefinidos para el registro deformable o rígido. Posteriormente, se crearon nuevos volúmenes y transformaciones, lo que permitió visualizar el desplazamiento o aplicar la transformación a otros elementos. Para comparar los volúmenes fijos y registrados, se configuró el volumen fijo como primer plano y se ajustó la opacidad para evaluar la alineación. La visualización del campo de desplazamiento se activó en los visores de corte y/o en 3D, utilizando el módulo de Transformaciones. Además, para aplicar las transformaciones a otros elementos, se empleó el módulo de Transformaciones o la jerarquía de transformación en la pestaña Datos. Finalmente, se guarda el volumen de salida o las transformaciones realizadas mediante la opción de Guardar en el menú Archivo. Es importante mencionar que los parámetros del registro pueden ser personalizados según las necesidades del proyecto. [31]

Para comprender de mejor manera el proceso se muestra la imagen de un corte de resonancia magnética cardíaca y un corte de tomografía computarizada cardíaca, las cuales serán fusionadas (Figura 16), se simula la trasposición de ambas imágenes que están siendo corregistradas (Figura 17), se aprecia el resultado del corregistro de las imágenes, listas para ser segmentadas (Figura 18), este proceso se repite para cada corte de imagen.

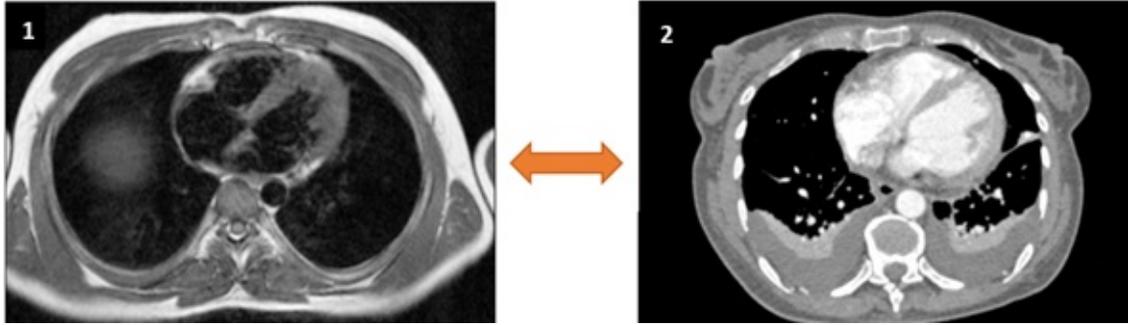


Figura 16: 1. Imagen de resonancia magnética cardíaca (RMC), 2. Imagen de tomografía computarizada cardíaca (TCC), que serán corregistradas

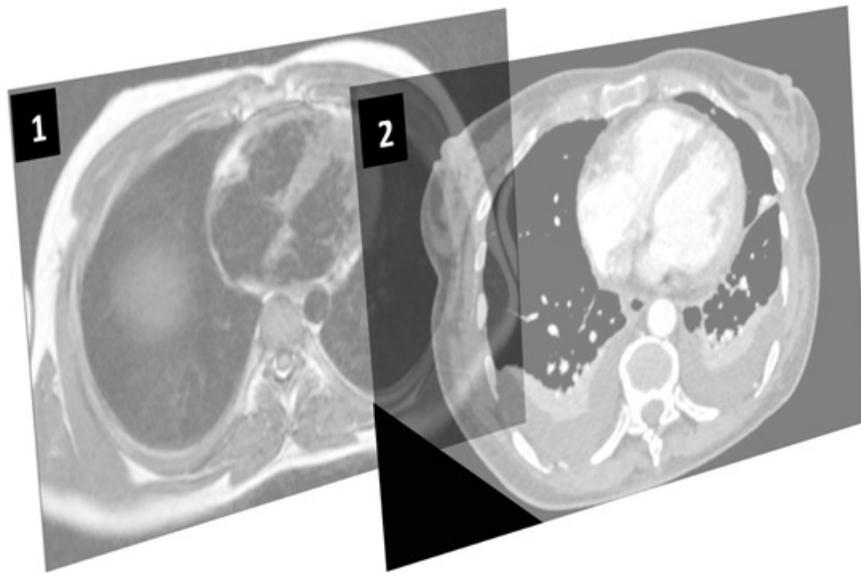


Figura 17: Fusión de imágenes de TCC y RMC

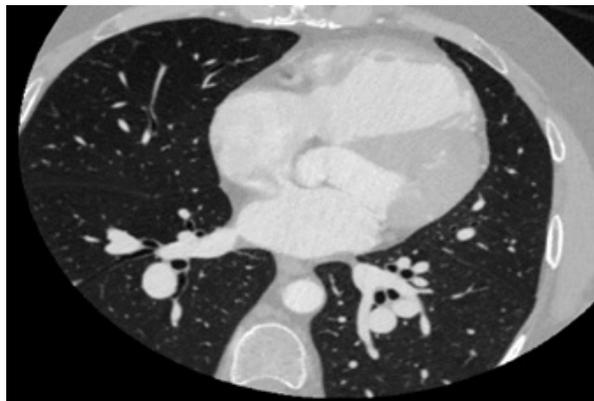


Figura 18: Imagen obtenida después de hacer el corregistro de TCC Y RMC.

7.3. Segmentación de imágenes médicas

Al tener las imágenes de TCC y RMC corregistradas, se inicia la fase de segmentación de las imágenes que consiste en realizar un “delineado” que es básicamente dibujar el área anatómica de acuerdo con la imagen médica, con el objetivo de crear los volúmenes tridimensionales necesarios para la estructura que se está segmentando (Figura 19). Para realizar la segmentación se agregó un segmento para cada estructura que se necesitó segmentar, en este caso fueron 12 segmentos (miocardio, aurícula derecha, aurícula izquierda, ventrículo derecho, ventrículo izquierdo, arteria pulmonar, vasculatura arterial (aorta y coronaria), vasculatura venosa (venas cavas superior e inferior), venas pulmonares, drenaje venoso anómalo, comunicación interauricular, comunicación a drenaje venoso anómalo), cada segmento anatómico normal tiene un color distinto predeterminado por 3D Slicer, se aplicó la función threshold que realiza una segmentación automática de las estructuras normales del corazón. [32]

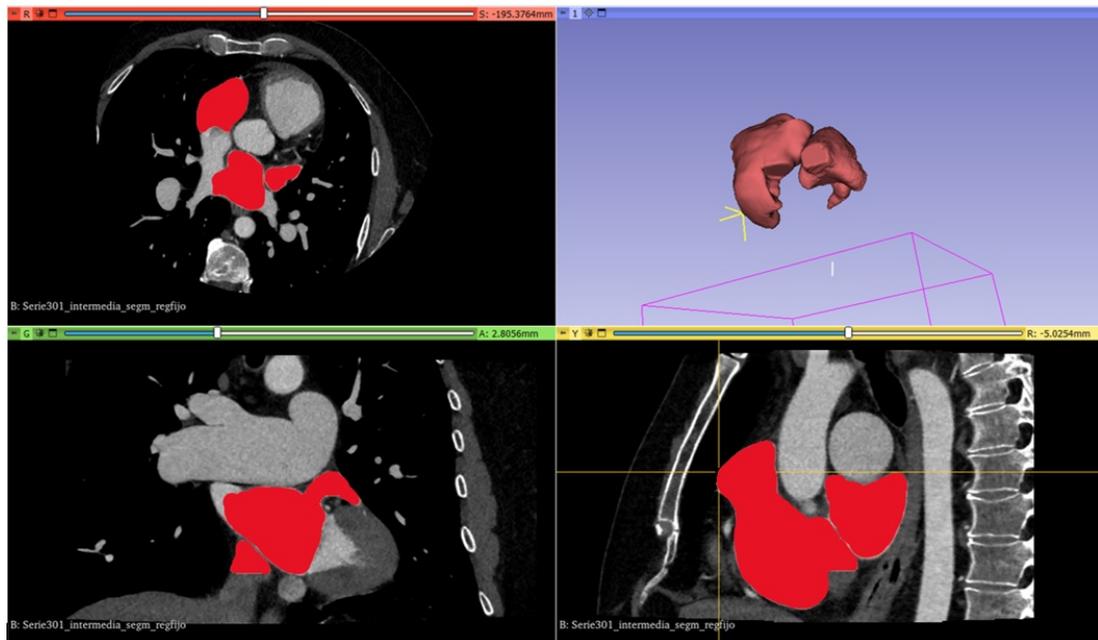


Figura 19: Proceso de segmentación en 3D Slicer: el área roja es el delineado realizado a la estructura cardíaca desesada, para obtener el modelo 3D, en este caso de la aurícula izquierda

Se correlacionó con el informe radiológico de la TCC y la RMC con las imágenes utilizadas y se identificaron las cardiopatías congénitas presentadas por el paciente, se realizó un pintado sobre éstas para diferenciarlas del resto de las estructuras normales. Posteriormente se revisó la segmentación automática obtenida con 3D Slicer, para asegurar que coincidiera con la anatomía exacta del paciente, para esto se consultó un manual de radiología "Pocket Atlas of Sectional Anatomy" [30], que contiene imágenes radiológicas del corazón y dibujos de éstas que permiten apreciar y entender correctamente cada estructura. [32]

Al tener segmentada cada estructura se evaluó modificar el aspecto morfológico según fue necesario, tomando en cuenta parámetros como relieve, color, luminosidad, entre otros; de esta manera se obtiene la imagen tridimensional. Se utiliza un modelo de contorno activo

y algoritmos de crecimiento de región adaptable antes de la reducción de ruido con un filtro de difusión anisotrópica y algoritmos N3. Para el procesamiento de modelos se utilizan filtros laplacianos con suavizado para corregir la derivación escalonada en el espesor de corte. El modelo geométrico 3D se exporta en formato de estereolitografía (STL). [32]

7.4. Impresión 3D del modelo anatómico del paciente

Al tener creado el modelo 3D en 3D Slicer, el siguiente paso es exportarlo en formato STL para su posterior procesamiento en Blender 4.0 [33], que se utiliza para preparar el modelo para la impresión. En Blender, se empieza seleccionando la opción **Importar** y se elige el formato STL en el que se guardó el modelo segmentado. Una vez cargado, fue necesario hacer tres cortes al miocardio para lograr ensamblarlo con el ventrículo derecho y el ventrículo izquierdo, se agregó un objeto que funcione como plano de corte, con la función **Plano** se ubico en el miocardio las áreas a cortar y se ajusto este plano para que intersekte el modelo. Se selecciona primero el modelo STL y luego el plano manteniendo presionada la tecla **Shift**, se accede al menú **Boolean** en la barra de herramientas, y se elige **Difference** y se presiona **Apply**. Esta función de **Boolean** con **Difference** permite cortar el STL utilizando el plano como herramienta de corte y además, para mejorar el modelo.

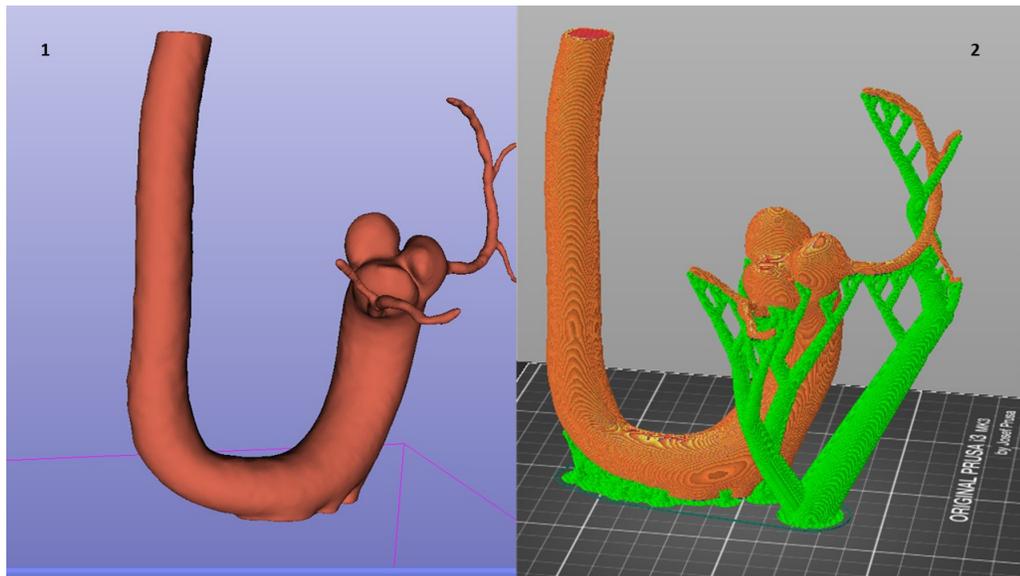


Figura 20: Procesamiento final para impresión 3D: 1. Modelo final texturizado. 2. Visualización de pieza en formato Stereolithography (STL) previo a impresión 3D, para colocación de soportes

Se realizó al modelo un texturizado, lo que involucra aplicar texturas para agregar detalles y refinamiento visual. Esto se logra seleccionando el objeto, accediendo a la pestaña de materiales, añadiendo texturas de imagen, ajustando sus propiedades como escala, en este caso no se modificó la escala porque se pretende que el modelo sea del tamaño del corazón del paciente, para refinar el modelo y reducir las gradaciones visuales generadas al segmentar en 3D Slicer, se seleccionan las áreas que presentaban más gradaciones, se utilizó

una textura de ruido suave y grano fino, logrando un efecto más liso en cada pieza. Al finalizar el proceso se guardaron los cambios y al momento de abrir nuevamente el archivo en formato Stereolithography (STL) de cada pieza se observó una pieza más fina, lista para su impresión (Figura 20),

Después de completar el proceso de texturizado, se examinó el archivo STL de la pieza y se colocaron los soportes necesarios estratégicamente al diseño para brindar estabilidad y asegurar la integridad estructural del objeto final, garantizando así un resultado preciso y sin deformaciones durante el proceso de impresión (Figura 20). Posteriormente, debe seleccionarse el material para la impresión, éste puede elegirse de acuerdo con los requerimientos del cirujano, por ejemplo si el cirujano necesita una pieza suave o más rígida. Para este trabajo se seleccionó el material ácido poliláctico (PLA). Para realizar la impresión, se llevó a cabo un cálculo detallado de la cantidad de material en gramos y pulgadas, así como el tiempo requerido para cada pieza impresa. A continuación, se presenta en detalle esta información para cada estructura anatómica impresa: Miocardio (MIO), Aurícula Izquierda (AI), Aurícula Derecha (AD), Ventrículo Izquierdo (VI), Ventrículo Derecho (VD), Vascularura Arterial (VA), Arteria Pulmonar (AP), Vasculatura Venosa (VV), Venas Pulmonares (VP), Comunicación Interauricular (CIA 1), Comunicación Auricular al Drenaje Venoso Pulmonar Anómalo (CIA 2), y Drenaje Venoso Pulmonar Anómalo (DVPA) (Cuadro 1).

Pieza anatómica	Filamento usado (g)	Filamento usado (in)	Tiempo de impresión
MIO	145.31	1918.13	18h 8m
AI	30.60	483.16	3h 43m
AD	60.98	804.94	6h 9m
VI	24.54	323.91	3h 4m
VD	80.96	1068.73	10h 7m
VA	55.42	731.61	6h 32m
AP	221.79	2927.62	1d 5h 26m
VV	37.87	499.84	5h 17m
VP	106.12	1400.75	20h 11m
CIA 1	0.28	3.69	3m
CIA 2	0.95	12.60	6m
DVPA	36.60	483.07	6h 59m

Cuadro 1: Cálculo de filamento usado en gramos (g) y pulgadas (in) y el tiempo de impresión para cada pieza

Para llevar a cabo la impresión 3D de cada estructura anatómica del modelo, se optó por utilizar ácido poliláctico (PLA) debido a su asequibilidad, amplia disponibilidad en el mercado y una serie de ventajas significativas tales como su facilidad de uso, ya que es accesible para usuarios de todos los niveles de experiencia, sin requerir ajustes complejos en las impresoras 3D. Su disponibilidad amplia y costos razonables lo hacen atractivo en términos económicos. Además, el PLA es biodegradable y respetuoso con el medio ambiente. Ofrece estabilidad dimensional al presentar una menor tendencia a la deformación durante la impresión, lo que resulta en piezas más consistentes y precisas, emite un olor mínimo, no es tóxico y está disponible en una amplia variedad de colores y acabados, brindando versatilidad en la creación de modelos con detalles visuales diferenciados. La elección de va-

rios colores distintivos permitió diferenciar claramente cada estructura, siguiendo una paleta representativa asociada con cada pieza anatómica específica, facilitando su identificación y comprensión dentro del modelo 3D impreso final (Figura 21).

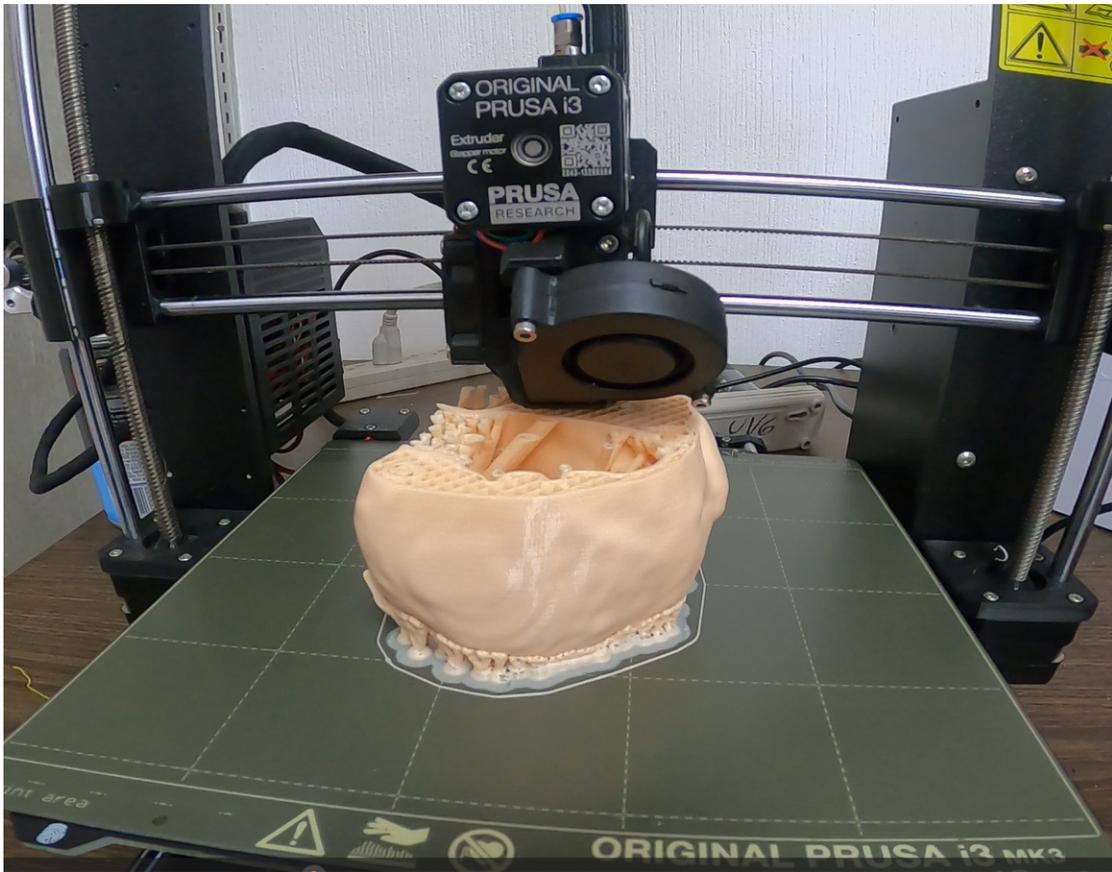


Figura 21: Proceso de impresión del miocardio en PLA con impresora Prusa con una duración de 18 horas 8 minutos

Para el ensamblaje, se pretende utilizar imanes estratégicamente colocados para las piezas grandes junto con cinta adhesiva de doble cara para las piezas pequeñas. Esta combinación permite que el modelo sea desmontable, lo cual es fundamental para observar minuciosamente cada pieza impresa. Esta metodología hace posible un análisis detallado de la estructura, facilitando la identificación de posibles discrepancias o áreas que requieran ajustes adicionales.

8.1. Modelo 3D para planificación quirúrgica de una comunicación interauricular (CIA)

8.1.1. Selección de paciente con cardiopatía congénita

Para la elaboración de modelo 3D cardíaco para planificación quirúrgica, se seleccionó un paciente de 42 años que inició con dolor torácico con empeoramiento de la frecuencia cardíaca, se le realizó un electrocardiograma en el que se reportó ritmo sinusal de 75 lpm y bloqueo incompleto de rama derecha del haz de his Q III, se tomaron imágenes médicas de angio tomografía computarizada (TC) y resonancia magnética (RM) las cuales se aprecia un defecto interauricular de aproximadamente 10 mm a nivel de fosa oval el cual es compatible con defecto tipo comunicación interauricular (CIA) Ostium Secundum y Drenaje venoso anómalo de venas de LSD a VCS (identificándose 2 ramas independientes). Drenaje venoso anómalo de VLM en VCS. Las venas de LID drenan en aurícula izquierda. Defecto en la porción superior del tabique compatible con CIA tipo seno venoso superior.

La CIA, una de las anomalías cardíacas más comunes que se manifiestan en la adolescencia o en la edad adulta, se beneficia de la evaluación mediante tomografía computarizada cardíaca. Esta técnica es fundamental debido a su alta resolución, que posibilita la observación detallada de la forma, límites y ubicación de la imperfección. Además, facilita la medición de las distancias entre la CIA, las venas pulmonares, la válvula mitral y la válvula aórtica. Estos datos son esenciales para determinar la estrategia de tratamiento necesaria, eligiendo entre un procedimiento percutáneo o una intervención quirúrgica abierta. La ventaja adicional de la TC radica en su capacidad para realizar una reconstrucción tridimensional, mejorando así la apreciación de la anatomía (Figura 22).

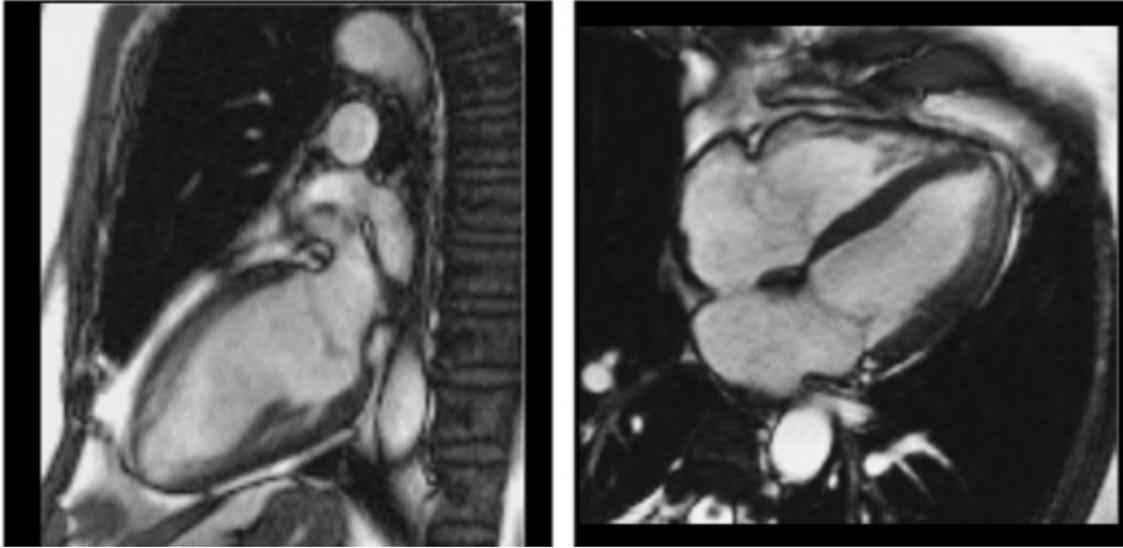


Figura 22: Tomografía computarizada cardíaca [30](#)

En lo que respecta a la resonancia magnética cardíaca (Figura 23), su valor reside en la capacidad de las secuencias que se aplican de forma transversal al tabique y en el eje corto para evaluar diversos aspectos relacionados con la anomalía septal, como su tamaño, ubicación y morfología. Además, estas secuencias permiten analizar el sistema de drenaje venoso pulmonar y detectar posibles enfermedades cardíacas concomitantes. A través de las secuencias de contraste de fase, se puede determinar la dirección y la magnitud del cortocircuito, mientras que las secuencias multifase-multicorte facilitan la evaluación de la función ventricular.

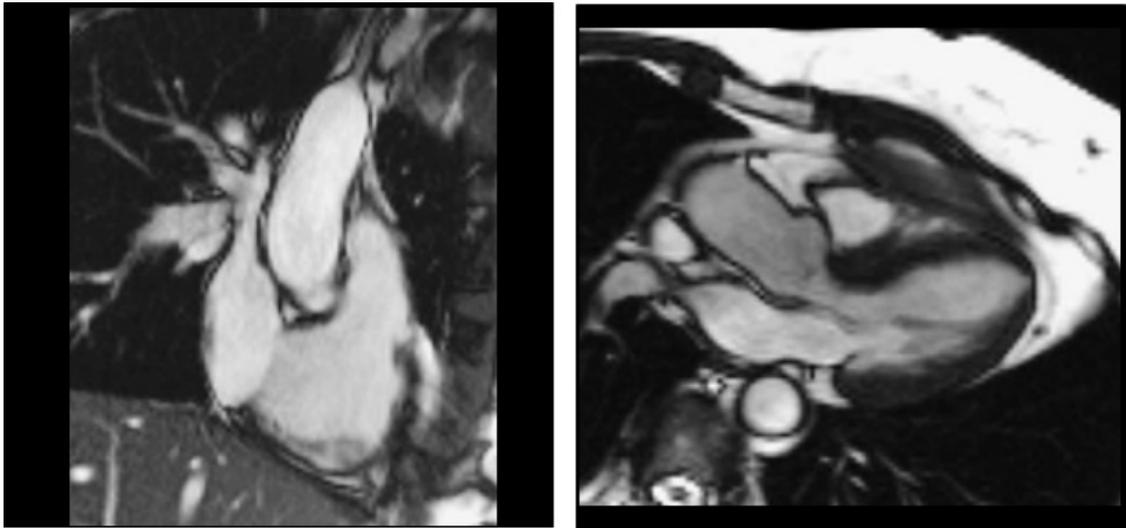


Figura 23: Resonancia magnética cardíaca [30](#)

8.1.2. Corregistro de imágenes médicas

Como resultado del proceso de corregistro, obtuvieron imágenes fusionadas que integran los cortes de TCC y RMC en formato DICOM. Estas imágenes combinadas representan una vista unificada y coherente de las estructuras anatómicas, permitiendo su uso inmediato en la segmentación individualizada de cada región de interés. Las imágenes obtenidas después de este proceso se observan a continuación en los planos axial o transversal, sagital y coronal (Figura 24).

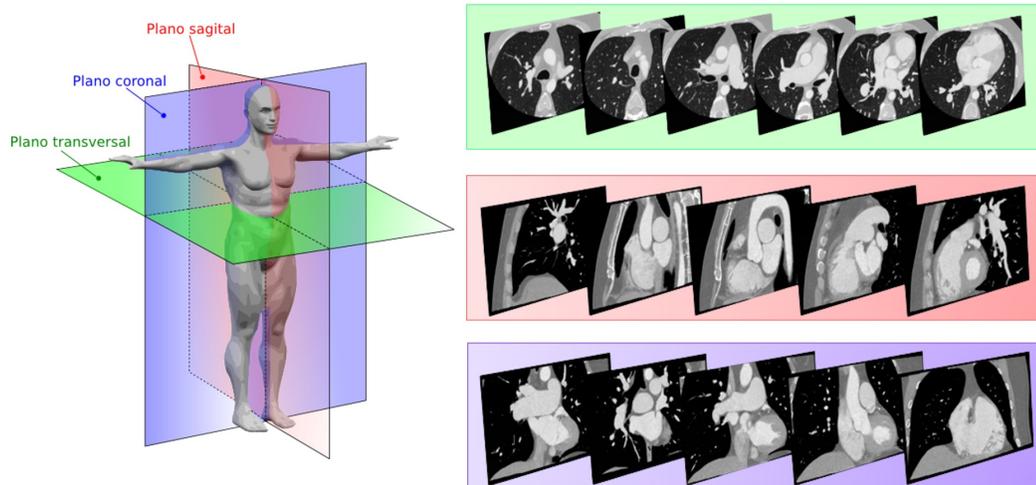


Figura 24: Distribución de los planos anatómicos a la izquierda [34](#), Imágenes de los planos axial o transversal, sagital y coronal en formato DICOM a la derecha

8.1.3. Segmentación de estructuras anatómicas

El proceso de segmentación se realiza a partir de 160 cortes de imágenes médicas, los cuales deben ser revisados minuciosamente para lograr un delineado preciso de cada estructura en cada una de estas imágenes. Este proceso de segmentación se repitió para cada una de las 12 estructuras identificadas. Para la segmentación del corazón del paciente seleccionado, se identificaron y resaltaron un total de doce regiones de interés. Estas regiones se visualizan de manera óptima en el corte axial de las imágenes médicas, por lo que este corte se utilizó como base para la segmentación. Estas áreas se dividen en dos categorías principales: nueve corresponden a la anatomía normal del corazón, mientras que las tres restantes corresponden a defectos cardíacos congénitos. A continuación, se presenta una breve descripción del proceso de segmentación de estas áreas:

- Segmentación de las aurículas

La segmentación precisa de las aurículas es fundamental para una evaluación cardíaca completa y precisa. Este proceso ayuda a los profesionales de la salud a identificar y comprender mejor las condiciones cardíacas del paciente, lo que a su vez influye en las decisiones clínicas y el tratamiento adecuado (Figuras 25 y 26).

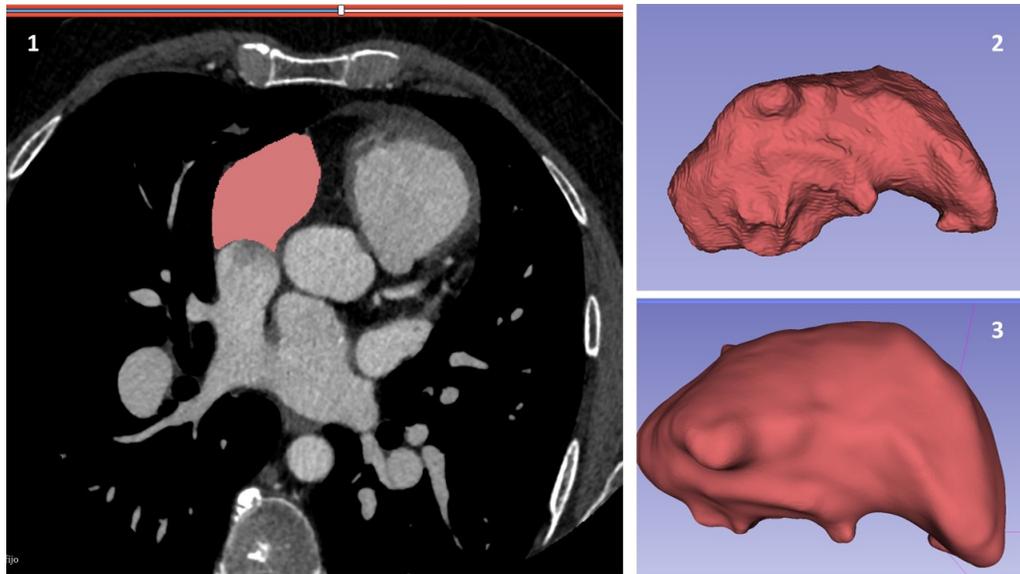


Figura 25: Segmentación aurícula derecha. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

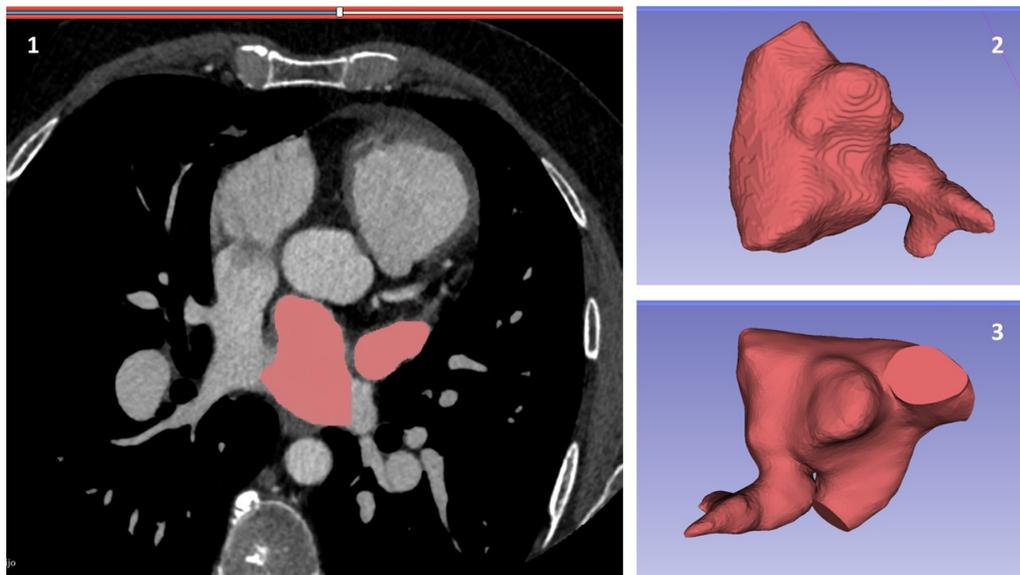


Figura 26: Segmentación aurícula izquierda. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

- Segmentación de miocardio

La segmentación del miocardio es un desafío complejo debido a varias razones. Una de las principales dificultades reside en que, en ciertas áreas, el miocardio no está claramente delimitado y puede confundirse con las cavidades cardíacas, como los ventrículos. Esto exige un nivel avanzado de precisión en la delimitación de los contornos del miocardio, especialmente en áreas de transición. Además, el corazón es un órgano dinámico que experimenta cambios significativos durante el ciclo cardíaco. La segmentación debe capturar estos cambios, considerando el movimiento del músculo cardíaco

y su variación de forma. Esto es esencial para una evaluación precisa de la función cardíaca y para detectar patologías como hipertrofia o dilatación ventricular (Figura 27).

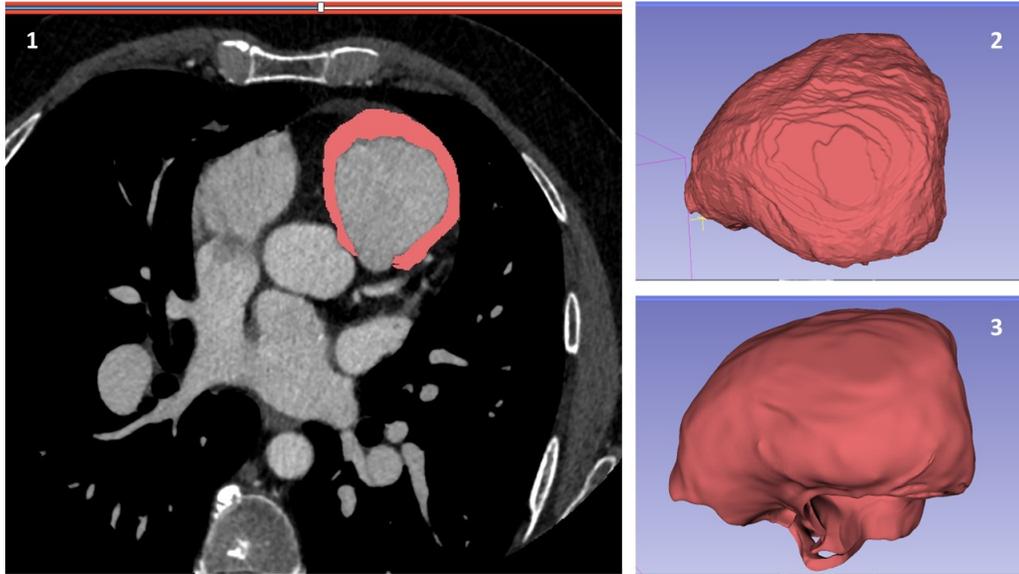


Figura 27: Segmentación miocardio. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

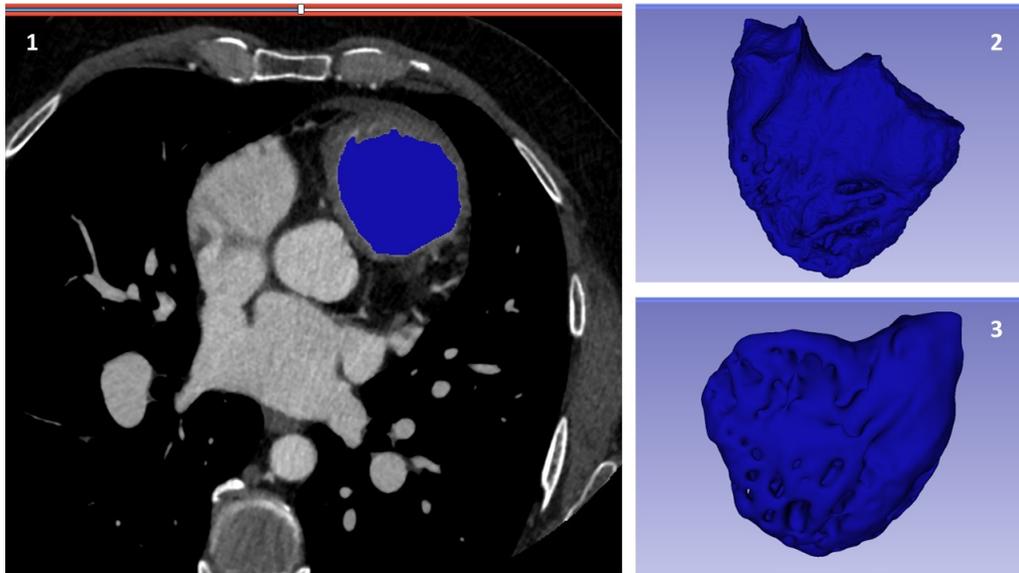


Figura 28: Segmentación ventrículo derecho. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

- Segmentación de los ventrículos

La segmentación de los ventrículos cardíacos es un proceso complejo debido a la variabilidad de la forma de los ventrículos durante el ciclo cardíaco, que abarca la contracción y relajación. Esta técnica permite delimitar con precisión los contornos de los

ventrículos en todas las fases del ciclo, proporcionando información sobre la salud del corazón y la presencia de problemas estructurales, la existencia de tabiques, comunicaciones interventriculares o disfunciones valvulares, así como la presencia de masas o vegetaciones cardíacas (Figuras 28 y 29).

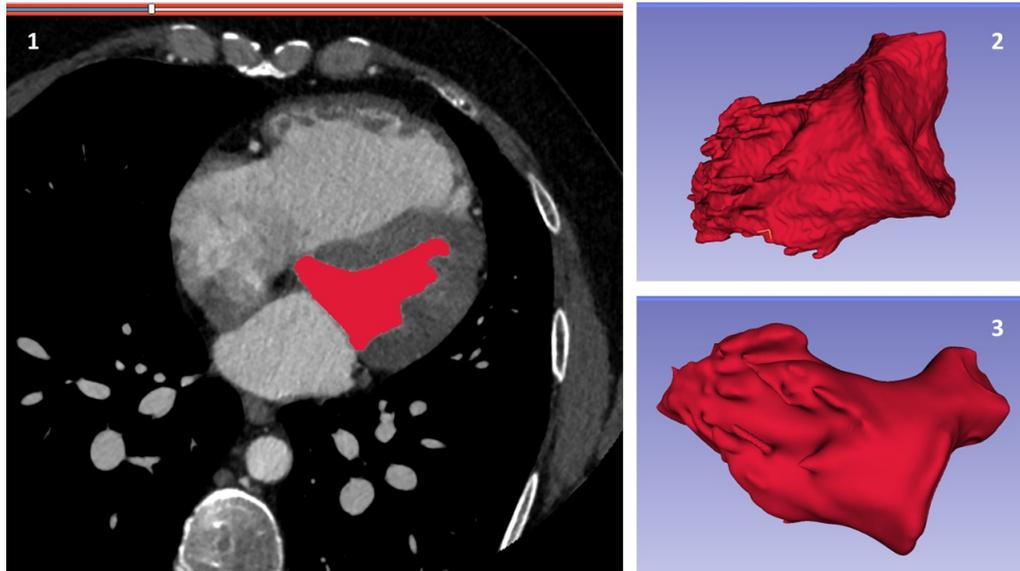


Figura 29: Segmentación ventrículo izquierdo. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

- Segmentación de la vasculatura

La segmentación de la vasculatura, además de demandar un profundo conocimiento de la anatomía, también exige que quien la realiza cuente con suficiente paciencia y un tiempo aún mayor que la segmentación de las demás estructuras. Esto se debe a la necesidad de seguir minuciosamente el trayecto de cada vaso sanguíneo, lo cual presenta un alto grado de complejidad. Uno de los desafíos fundamentales radica en que ningún vaso sanguíneo es idéntico en los pacientes, lo que implica adaptar constantemente el proceso de segmentación.

La segmentación de las venas pulmonares y la arteria pulmonar resulta ser un proceso demasiado complejo debido a las múltiples ramificaciones que cada una tiene y que se extienden hacia los pulmones, siendo el parénquima de estos últimos una estructura que complica más el proceso pues contiene otras ramificaciones como bronquios y bronquiolos. Además, el hecho de que las imágenes sean en blanco y negro agrega aún más dificultad, ya que es fácil confundir el trayecto de los vasos sanguíneos en estas condiciones. La vasculatura es esencial visualizar trastornos de éstos como trasposición de los grandes vasos, coartación de la aorta o conexión venosa pulmonar anómala como en el caso de este paciente (Figuras 30 a la 33).

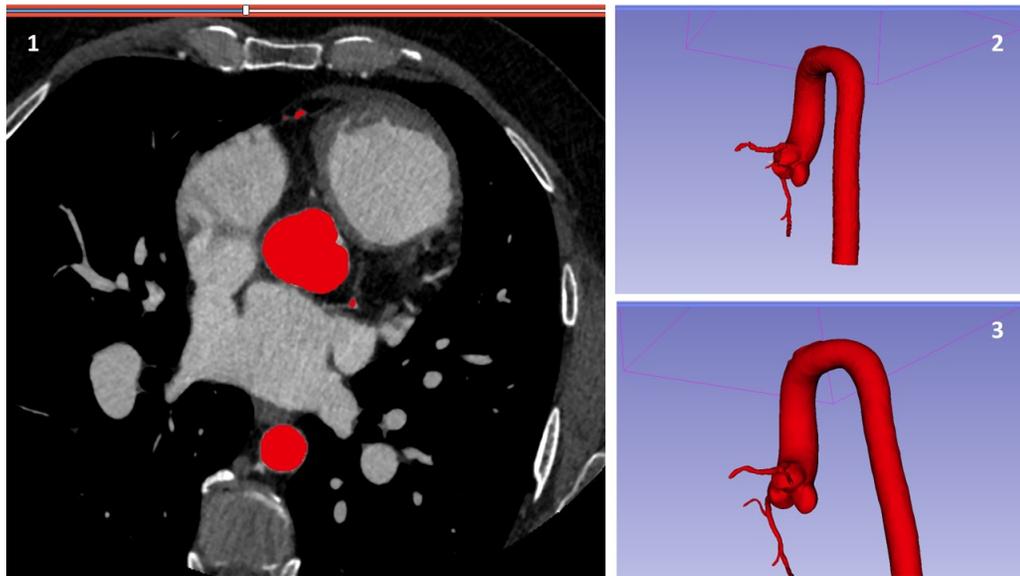


Figura 30: Segmentación vasculatura arterial. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

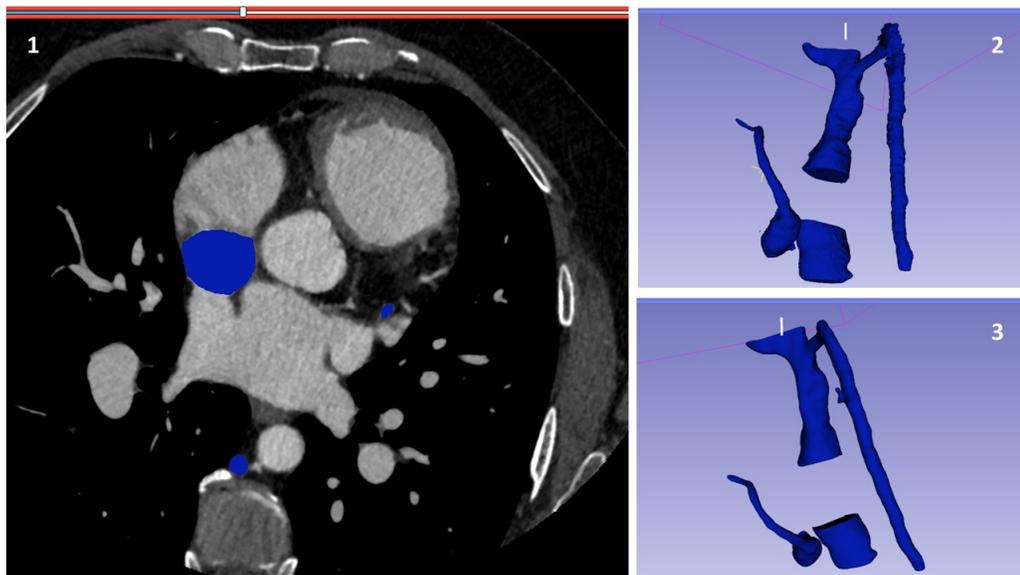


Figura 31: Segmentación vasculatura venosa. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

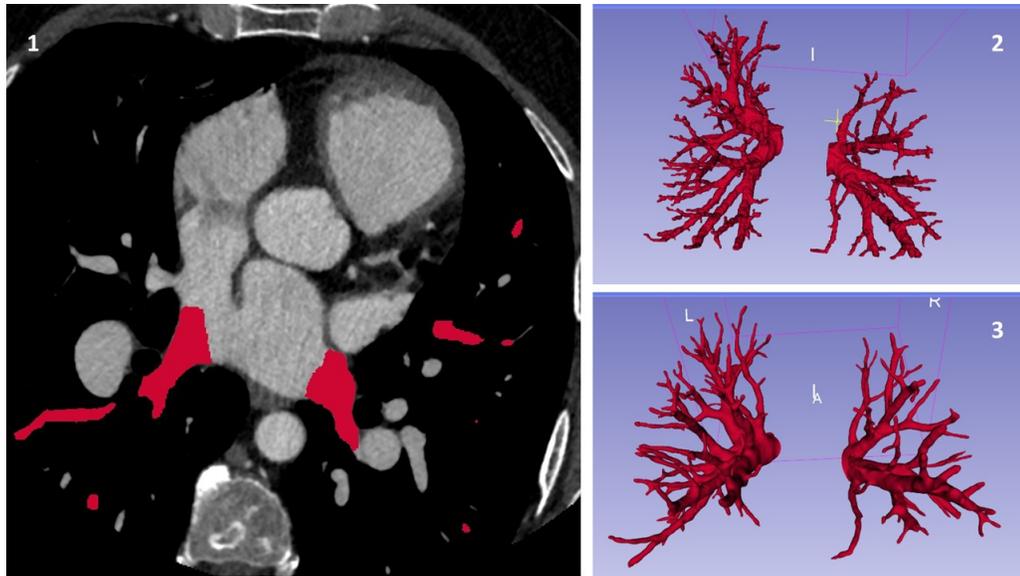


Figura 32: Segmentación venas pulmonares. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

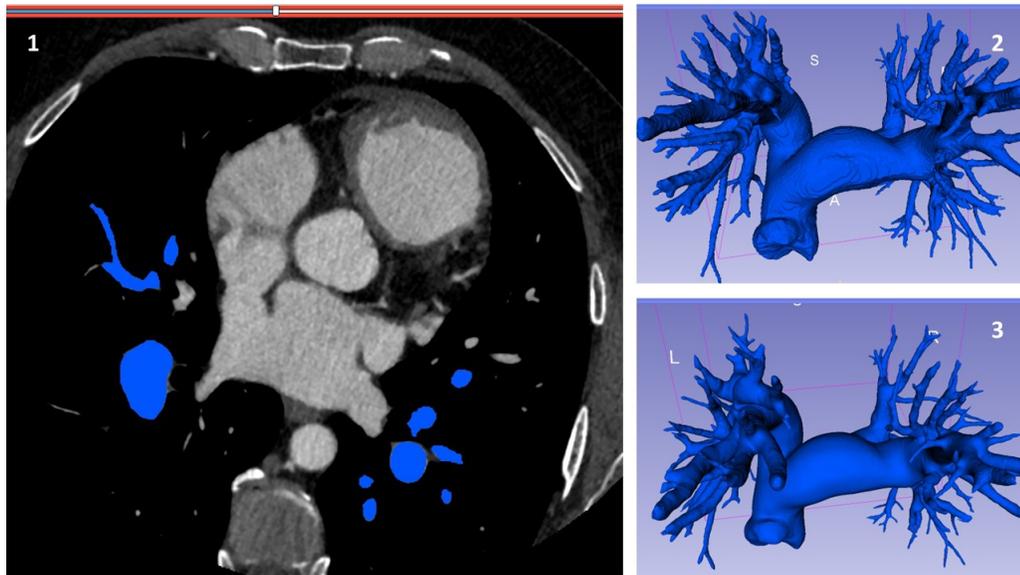


Figura 33: Segmentación arteria pulmonar. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

- Segmentación de defectos congénitos

Se ha resaltado la complejidad inherente en la tarea de segmentar las estructuras cardíacas. Aunque dichas estructuras suelen mostrar una notable similitud entre pacientes normales, la segmentación de defectos congénitos presenta un desafío aún mayor. Esto se debe a la necesidad de poseer un amplio conocimiento sobre cómo estos defectos se reflejan en las imágenes médicas. Por ende, además de tener un sólido entendimiento de la anatomía cardíaca, resulta indispensable contar con un profundo conocimiento de las patologías cardíacas para identificarlas de manera precisa. (Figuras 34 a la 36).

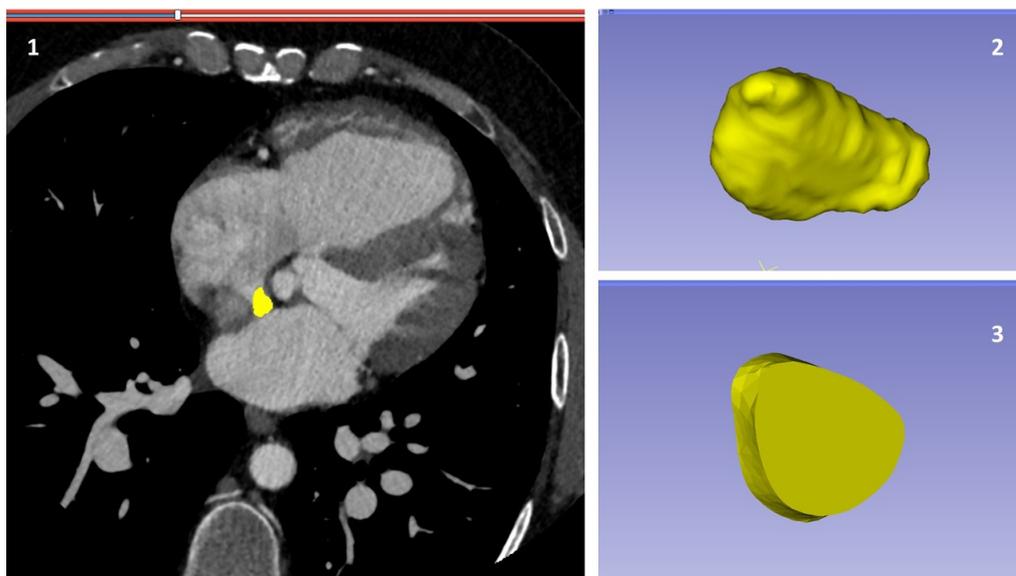


Figura 34: Segmentación de comunicación interauricular. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

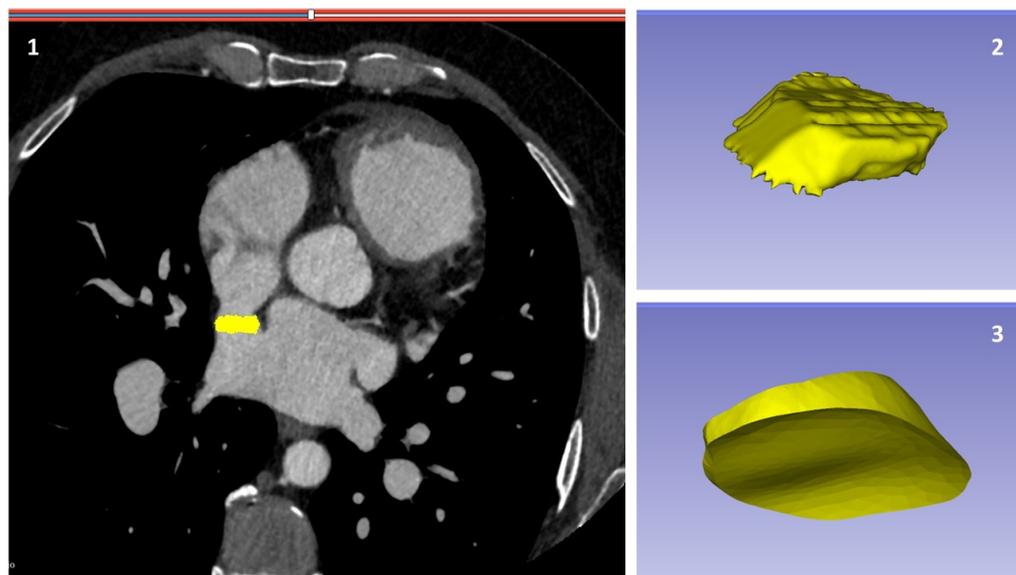


Figura 35: Segmentación de comunicación con drenaje venoso pulmonar nómalo. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

La segmentación del drenaje venoso pulmonar anómalo (Figura 35) demanda precisión y atención específica. Aunque esta área forma parte normal de las venas pulmonares y podría considerarse una estructura común, es crucial reconocer que en el contexto de la patología del paciente, representa un defecto cardíaco. Por lo tanto, su segmentación requiere una evaluación cuidadosa, ya que aunque parezca una estructura normal, su relevancia como anomalía cardíaca es fundamental.

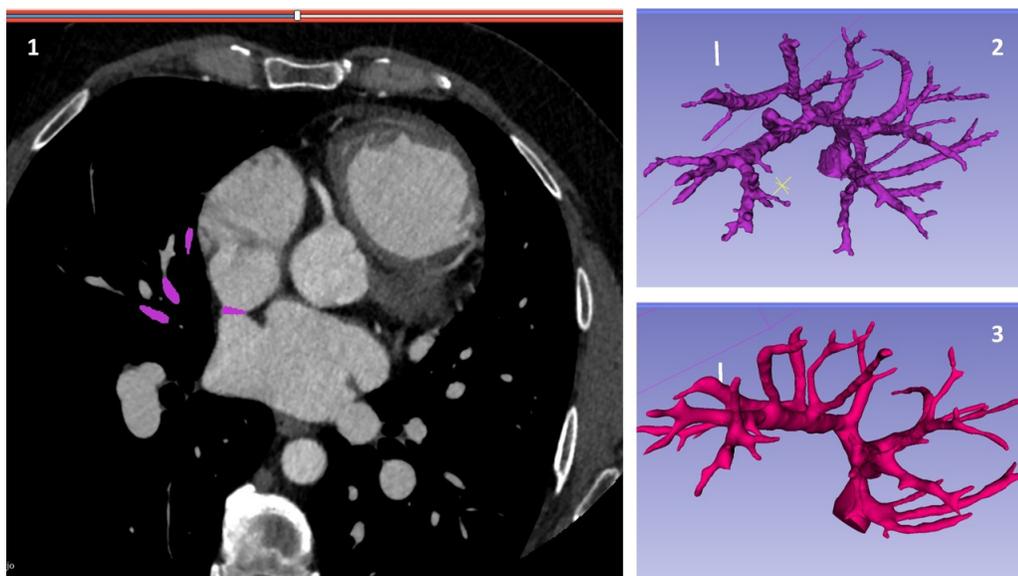


Figura 36: Segmentación de drenaje venoso pulmonar anómalo. 1. Imagen médica corregistrada. 2. Modelo 3D obtenido de la segmentación. 3. Modelo 3D suavizado

Una vez completada la segmentación, se lleva a cabo un proceso de suavizado para mejorar la apariencia del modelo. Este paso de suavizado ayuda a obtener un acabado más refinado y detallado, lo que es esencial para una representación precisa y útil en aplicaciones médicas y de diagnóstico (Figura 37).

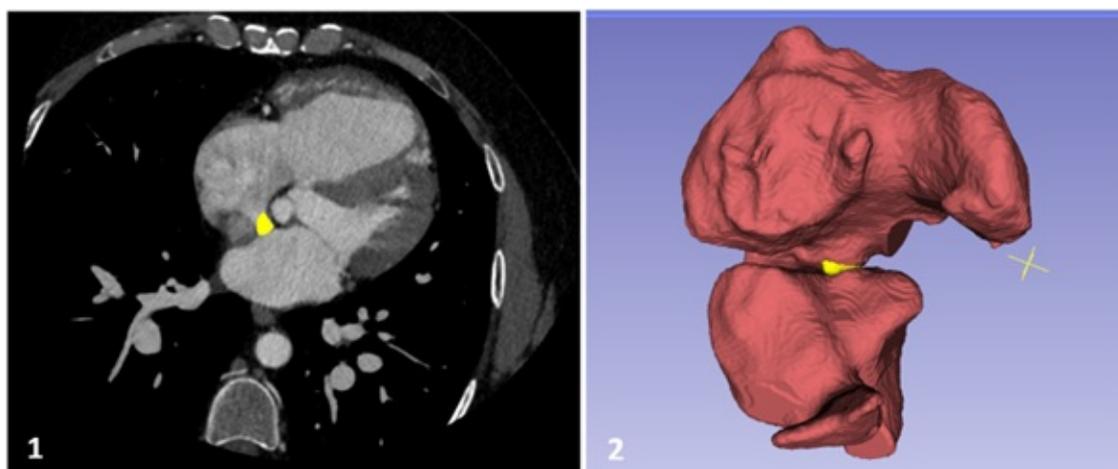


Figura 37: Comunicación interauricular (1. CIA resaltada en amarillo en imagen DICOM vista axial, 2. CIA resaltada en amarillo modelo 3D obtenido a partir de la segmentación)

La segmentación mejora significativamente la visualización de la anatomía y las anomalías congénitas presentes en el paciente. Esto se puede ilustrar claramente en la Figura 36, donde se compara la imagen DICOM de la CIA con la imagen después de aplicar la segmentación. Al realizar la segmentación, se obtiene una representación detallada de cada parte anatómica del corazón.

En la Figura 38 se puede apreciar la segmentación de varias estructuras, como la arteria pulmonar, la vasculatura arterial (arteria aorta y arterias coronarias), la aurícula izquierda con defectos congénitos, las aurículas derecha e izquierda, que están conectadas por la CIA, así como los ventrículos derecho e izquierdo y el miocardio y al final se muestra el corazón en su totalidad, compuesto por todas estas estructuras previamente segmentadas de forma individual.

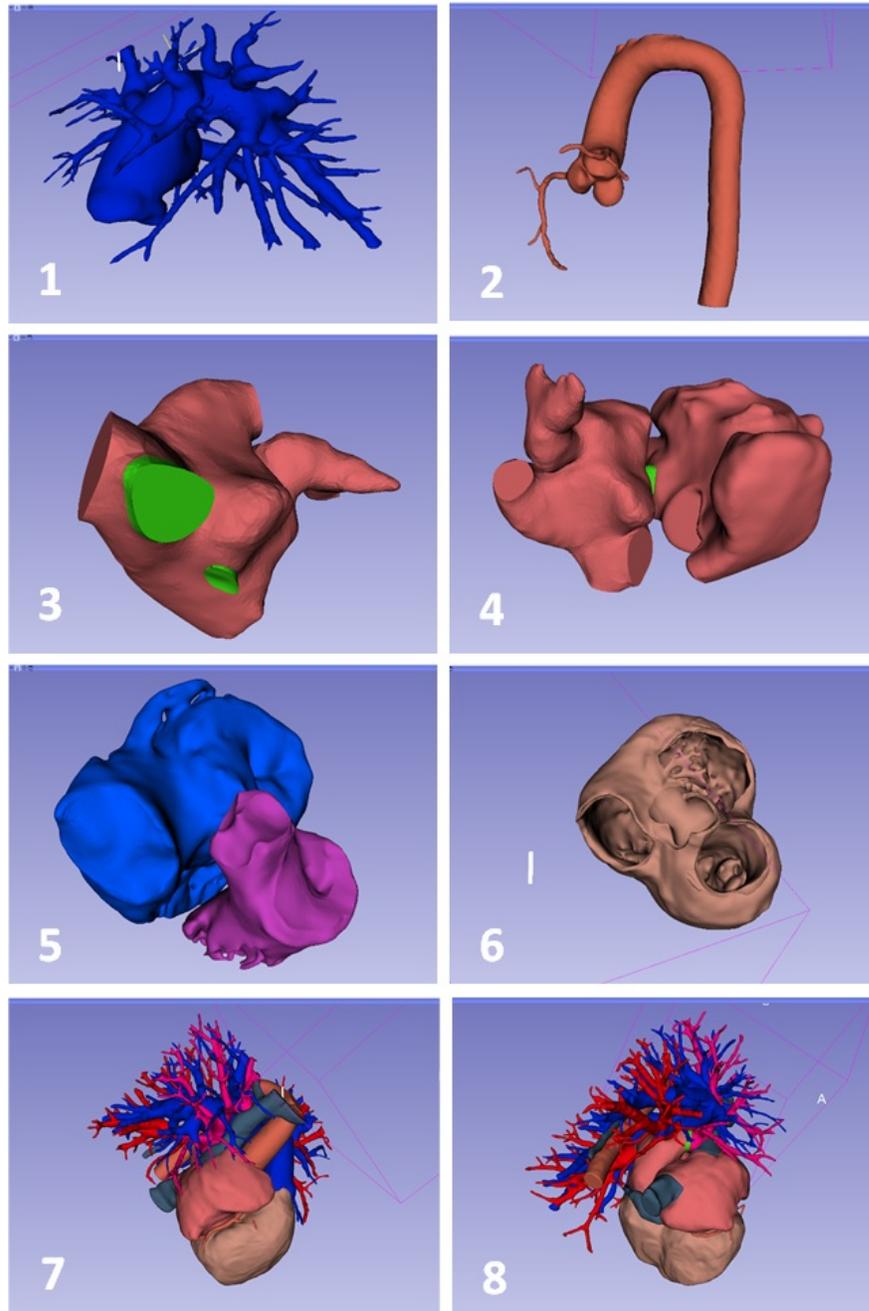


Figura 38: Segmentación Vista 3D (1. Arteria pulmonar, 2. Vasculatura arterial, 3. Aurícula izquierda con defectos congénitos, 4. Aurículas derecha e izquierda, conectadas por la CIA, 5. Ventrículo derecho e izquierdo, 6. Miocardio, 7. Vista anterolateral derecha, 8. Vista posterolateral derecha)

8.2. Impresión de Modelo 3D

Se realizó la impresión del modelo 3D utilizando filamento PLA. Tras varias horas de impresión, la pieza finaliza su proceso, aunque resta la tarea crucial de retirar los soportes empleados durante la impresión para prevenir deformaciones. En algunas piezas, esta tarea resultó sencilla y apenas llevó unos minutos. Sin embargo, con las estructuras más complejas, como las vasculaturas, el procedimiento se tornó más meticuloso y lento. La delicadeza era fundamental, especialmente al lidiar con vasos extremadamente delgados, ya que existía el riesgo de que se fracturaran al retirar los soportes.(Figura 39, 40 y 41).

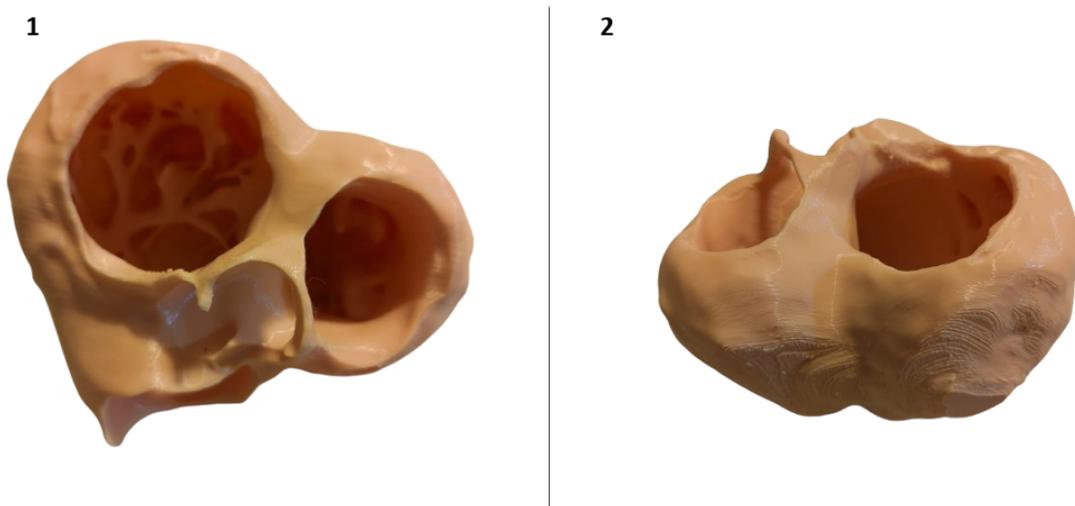


Figura 39: 1. Miocardio vista superior, 2 Miocardio vista posterior

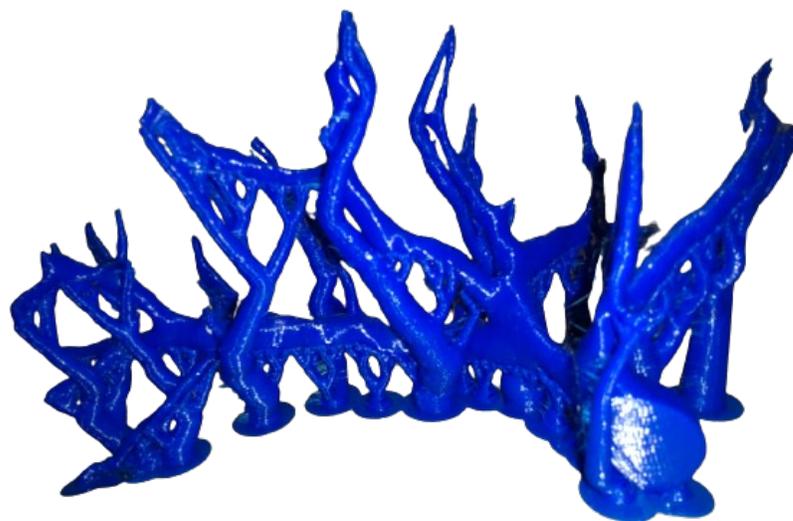


Figura 40: Vasculatura con soportes



Figura 41: Vasculatura después de retirar los soportes

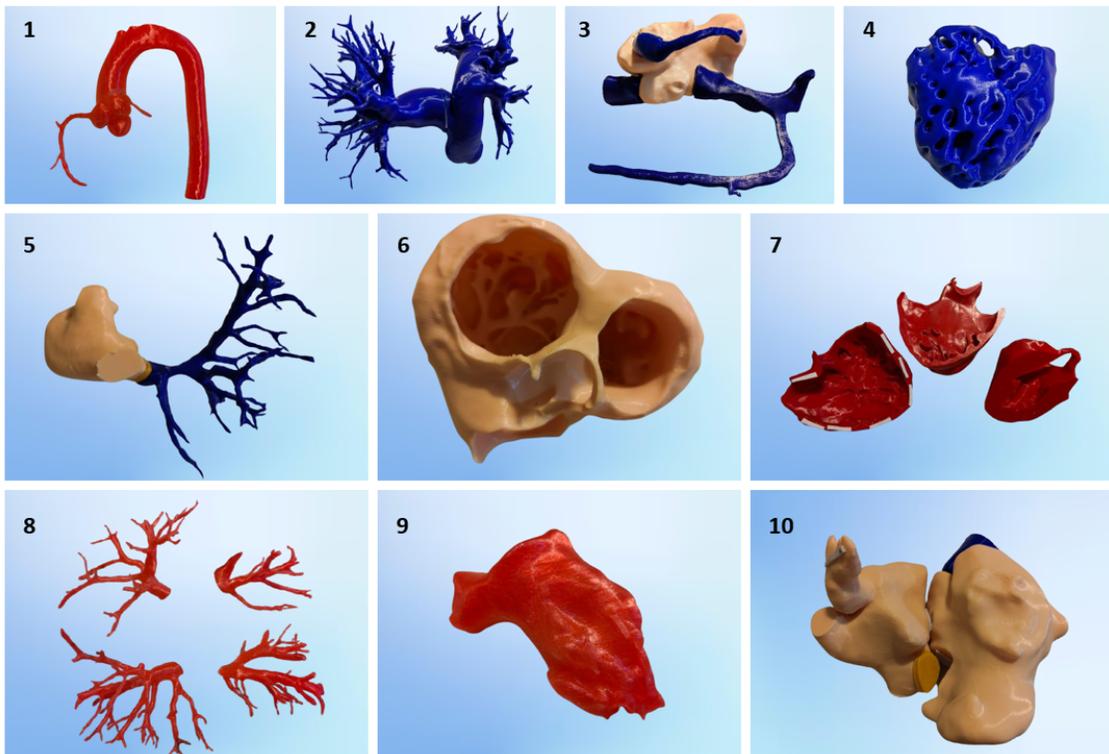


Figura 42: Piezas anatómicas impresas, 1. Vasculatura arterial, 2. Arteria pulmonar, 3. Aurícula derecha y vasculatura venosa, 4. Ventrículo derecho, 5. Aurícula izquierda con defecto cardíaco: drenaje venoso pulmonar anómalo, 6. Miocardio vista superior, 7. Miocardio dividido en tres piezas para ensamblar, 8. Venas pulmonares, 9. Ventrículo izquierdo, 10. Aurículas derecha e izquierda con defectos cardíacos: Comunicación interauricular, Comunicación de aurícula a arteria pulmonar.

El tiempo estimado total de impresión para el modelo 3D utilizando una sola impresora se calculó en 109 horas y 45 minutos, equivalente a 4 días, 13 horas y 45 minutos. No obstante, en esta ocasión se emplearon dos impresoras, lo que redujo considerablemente el tiempo a aproximadamente 2 días. (Figura 42). Durante el ensamblaje del modelo 3D, se encontró que tanto el ventrículo izquierdo como el derecho no ajustaban correctamente con

el miocardio, por lo que se imprimió nuevamente el miocardio en un intento de solucionar esta discrepancia. A pesar de este intento, persistieron dificultades para el ensamblaje de las piezas. Se intentó emplear imanes de 8mm de ancho por 1.5mm de grosor y cinta adhesiva de doble cara para las piezas más pequeñas, para ensamblar el modelo y permitir el desmontaje. Sin embargo, debido al peso de algunas piezas, se enfrentaron dificultades en lograr un ensamblaje preciso de todas ellas. A pesar de ello, las piezas específicas que representan las cardiopatías congénitas del paciente sí se ensamblaron con éxito (Figuras 43 y 44).



Figura 43: Aurículas derecha e izquierda con defectos cardíacos: Comunicación interauricular (blanco), Comunicación de aurícula a arteria pulmonar (amarillo)

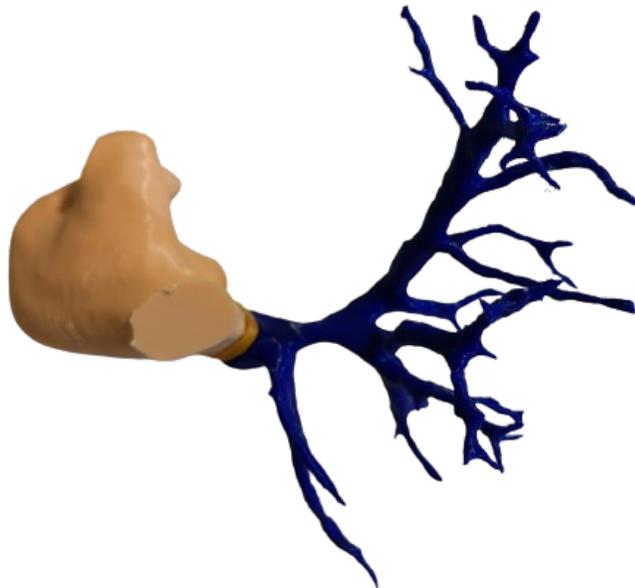


Figura 44: Aurículas izquierda con defecto cardíaco: drenaje venoso pulmonar anómalo (amarillo y azul)

8.3. Presentación de Modelo 3D a cirujanos cardiovasculares de UNICAR

Como parte de los objetivos del proyecto, se llevó a cabo una reunión en la Unidad de Cirugía Cardiovascular de Guatemala (UNICAR) con médicos cirujanos cardiovasculares. En esta sesión, se presentó detalladamente el proceso de creación de modelos 3D para planificación quirúrgica, resaltando sus ventajas en la preparación de procedimientos cardiovasculares. Se expusieron los beneficios obtenidos a través de estos modelos, incluyendo la reducción de tiempos quirúrgicos, el incremento en la precisión de los procedimientos y la disminución de complicaciones para los pacientes. Además, se presentó la utilidad adicional de los modelos 3D como herramienta educativa para cirujanos en formación (Figura 45).



Figura 45: 1 y 2 Explicación acerca del proceso para elaboración del modelo, funcionalidad y beneficios de su uso. 3 y 4 Cirujanos evaluando las piezas del modelo

En este encuentro, se invitó a los cirujanos a evaluar cada pieza del modelo, compartir sus opiniones sobre éste y a aportar sugerencias para mejorarlo, así como a proponer patologías específicas para las cuales les gustaría utilizar este enfoque en el futuro (Figura 46). Los comentarios recibidos incluyeron: el Dr. Guzmán destacó que estos modelos podrían complementar otras tecnologías, como la realidad aumentada, que ha observado en el uso de imágenes médicas. Por su parte, el Dr. Bonilla sugirió la creación de modelos relacionados con el drenaje anómalo de arterias coronarias, tanto si la arteria derecha nace de la izquierda como si la izquierda nace de la derecha, argumentando que proporcionaría información valiosa durante los procedimientos quirúrgicos. Además, Dr. Sánchez expresó su interés y consideró muy relevante la utilidad educativa de estos modelos 3D para el aprendizaje de residentes, permitiéndoles practicar procedimientos antes de enfrentarse a pacientes reales.



Figura 46: 1 Cirujanos discutiendo las piezas del modelo. 2 y 3 Armado del modelo 3D. 4 Cirujano ofrece sus opiniones sobre el modelo y proporciona sugerencias que podrían ser útiles para la planificación quirúrgica.

8.4. Implementación de Modelos 3D en la Planificación quirúrgica y cirugía

Para obtener un entendimiento detallado sobre la utilidad de los modelos 3D en la planificación quirúrgica y durante la cirugía, se realizó una documentación exhaustiva de todo el proceso. Esto incluyó la presentación inicial del modelo al equipo quirúrgico, donde se explicó el funcionamiento de la plataforma y se permitió una observación minuciosa de las estructuras. Este paso permitió determinar el enfoque más adecuado para abordar la lesión del paciente. Además, se registró el procedimiento quirúrgico en el que se empleó el modelo como referencia en tiempo real, posibilitando la comparación entre la anatomía del paciente y la del modelo 3D. Asimismo, se documentó el uso adicional del modelo en realidad aumentada, fundamental para guiar la colocación precisa de los trocares del robot quirúrgico en las áreas anatómicas correctas (Figuras 47 a la 49).

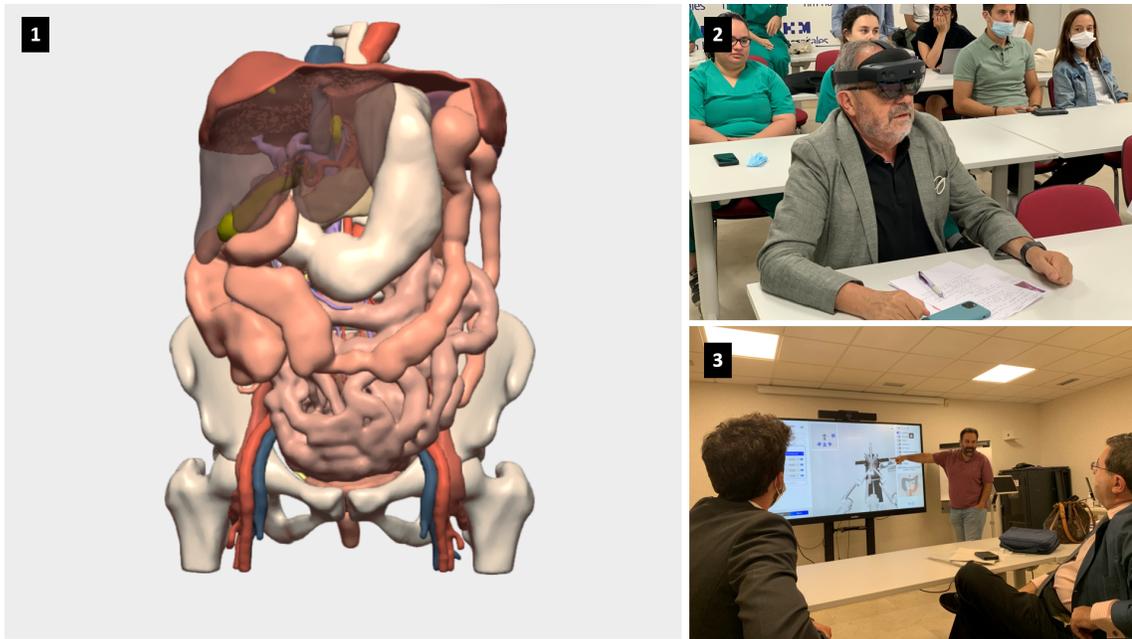


Figura 47: 1. Presentación de un modelo 3D abdominal. 2. Cirujano observando el modelo en realidad aumentada. 3. Cirujano utilizando el modelo para explicar cómo deben colocarse los trocares durante la cirugía

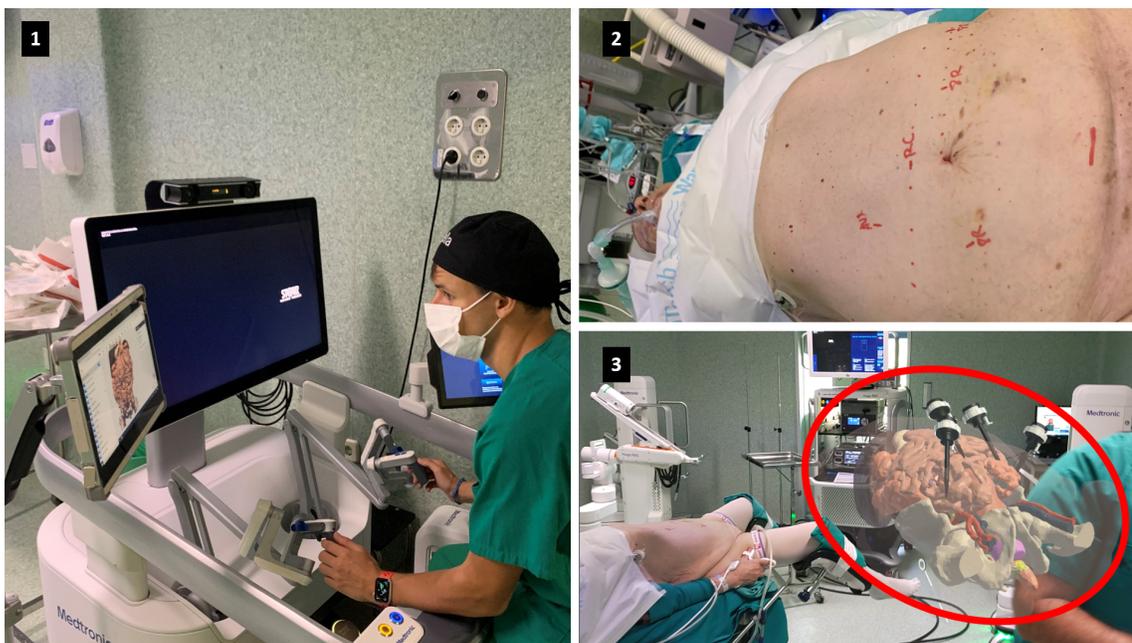


Figura 48: 1. Ingeniero biomédico de Cella Medical Solutions, colocando la pantalla para visualizar el modelo virtual durante la cirugía. 2. Paciente en la camilla con las marcas guía para situar los trocares del robot quirúrgico. 3. Visualización del modelo en realidad aumentada

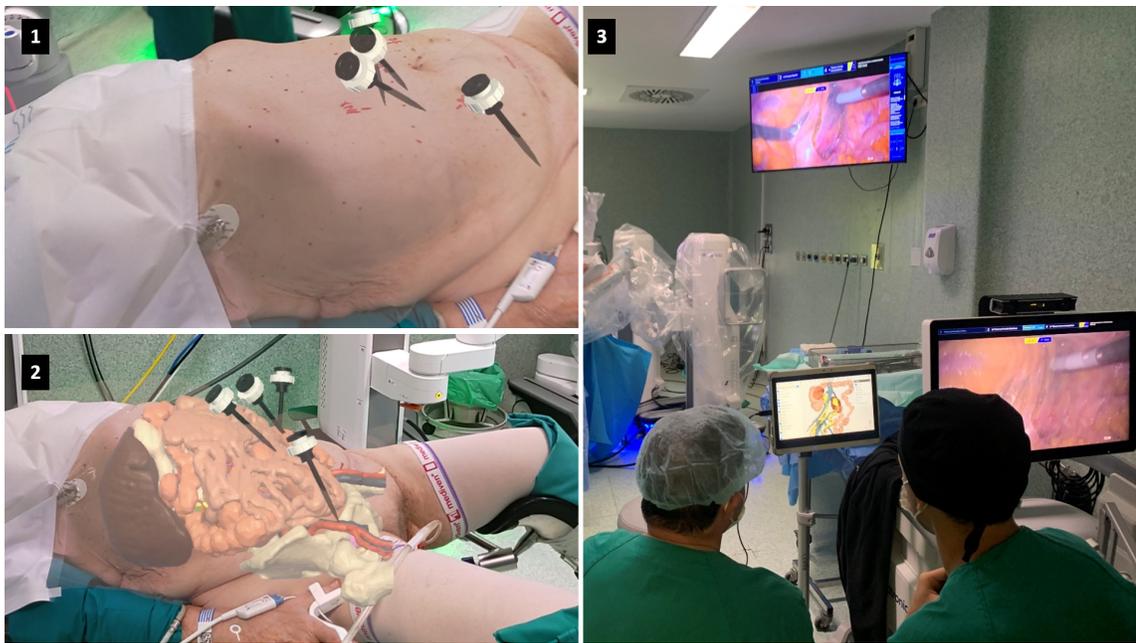


Figura 49: 1. Posicionamiento de trócares en el paciente, visualizados en realidad aumentada. 2. Posicionamiento del modelo en realidad aumentada sobre el paciente para guía quirúrgica. 3. Uso de modelo virtual durante la cirugía

Durante el desarrollo de esta investigación, se ha explorado un tema de creciente relevancia en la simplificación de la planificación quirúrgica, un enfoque que está siendo cada vez más adoptado en países desarrollados y que ha demostrado mejorar de manera notable los resultados antes, durante y después de las cirugías en los pacientes a quienes se ha aplicado [35]. Aunque esta tecnología puede ser aplicada en una amplia variedad de procedimientos quirúrgicos, se ha decidido centrar este proyecto en el ámbito de la cardiología, específicamente en las cardiopatías congénitas, que representan un conjunto heterogéneo de afecciones cardíacas que afectan a pacientes desde su nacimiento hasta la edad adulta.

El desarrollo de un modelo 3D innovador ha sido esencial en esta investigación, destacando la importancia crucial de la planificación quirúrgica específica para los pacientes con cardiopatía congénita. Este modelo proporciona una representación tridimensional detallada de la anatomía cardíaca e integra información clínica y funcional esencial para el proceso de toma de decisiones. [35]

9.1. Descripción del Modelo 3D

El modelo 3D desarrollado en el marco de esta investigación se basa en avanzadas técnicas de procesamiento de imágenes médicas y modelado tridimensional. Aprovechando datos de imágenes médicas como tomografías computarizadas cardíacas y resonancias magnéticas cardíacas, las cuales han sido fusionadas mediante técnicas de correregistro para integrar de manera precisa la información de cada estudio, se ha logrado crear una representación de alta resolución de la anatomía cardíaca de pacientes que padecen cardiopatías congénitas.

Este modelo ofrece una visualización detallada de la estructura cardíaca, destacando las variaciones anatómicas que surgen debido a las cardiopatías congénitas presentes en el pa-

ciente. No solo permite una representación visual, sino que también proporciona información funcional crucial, como la dinámica del flujo sanguíneo y la función auricular. Esta combinación de datos anatómicos y funcionales posibilita una evaluación minuciosa y personalizada de la situación cardíaca de cada paciente, lo cual se revela esencial en la toma de decisiones quirúrgicas, ya sea en la fase previa a la cirugía, durante la intervención o en el seguimiento posoperatorio.

La creación de modelos 3D para planificación quirúrgica es una tarea sumamente compleja que idealmente requiere la colaboración de un equipo multidisciplinario. Este equipo no solo aporta conocimientos médicos para validar que el modelo se ajuste con precisión a la estructura cardíaca del paciente, sino que también se apoya en la experiencia en modelado tridimensional e impresión 3D para la obtención de un modelo físico tangible. Es importante destacar que la elaboración manual de un modelo anatómico 3D resulta especialmente desafiante, incluso en el caso de un corazón sin anomalías congénitas, y se vuelve aún más compleja cuando se trata de un corazón con defectos congénitos.

El corazón normal consta de dos aurículas, la aurícula derecha y la aurícula izquierda. Identificar estas estructuras en una imagen médica es un paso esencial en la segmentación del corazón del paciente. Sin embargo, este proceso se torna complejo debido a la necesidad de delimitar de manera precisa cada aurícula y detectar cualquier variante anatómica o estructural causada por cardiopatías congénitas o adquiridas. Como fue en este caso debido a que el paciente presenta tres defectos congénitos dos de los cuales se encuentran directamente en la aurícula izquierda. No obstante, la segmentación de la vasculatura es de gran importancia debido a las numerosas cardiopatías que pueden manifestarse en estos vasos. Identificar y analizar adecuadamente la vasculatura es esencial para diagnosticar y tratar eficazmente una amplia variedad de trastornos cardíacos. Por lo tanto, a pesar de los desafíos involucrados, este proceso es uno de los más significativos en el campo de la cardiología y la medicina cardiovascular.

La identificación y segmentación precisa de los defectos congénitos en los pacientes constituye un proceso particularmente complicado. En este contexto, se debe ser capaz de reconocer y distinguir una variedad de anomalías cardíacas que pueden variar considerablemente de un caso a otro. La clave para lograr una segmentación adecuada suele residir en la combinación de conocimiento clínico, informes radiológicos y la consulta de la literatura médica. Sin embargo, persiste el riesgo de pasar por alto un defecto congénito o una enfermedad cardíaca adquirida, lo que resalta aún más la importancia de llevar a cabo una revisión minuciosa y exhaustiva del trabajo realizado. La certeza de que la segmentación está bien hecha es esencial, ya que un diagnóstico incorrecto o incompleto podría tener graves consecuencias para la salud del paciente. La segmentación de defectos congénitos y enfermedades cardíacas requiere una atención meticulosa y un compromiso constante con la mejora continua para garantizar la calidad del modelo que se está elaborando. La Figura 50, permite realizar una comparación entre las imágenes de TCC que eran usadas para realizar la planificación quirúrgica anteriormente y los modelos 3D utilizados en la actualidad.

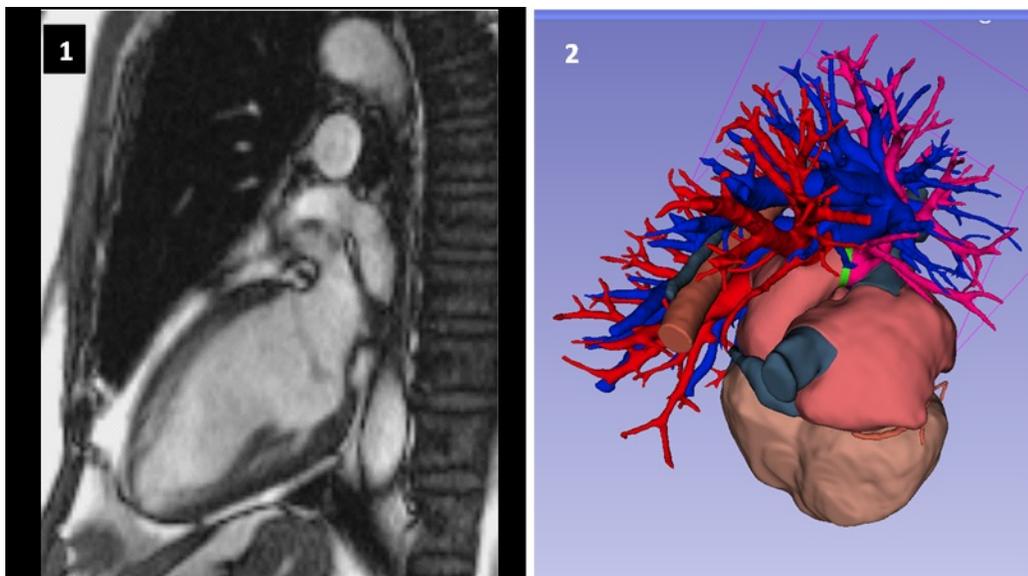


Figura 50: Imagen TC vrs Modelo 3D (1. Planificación quirúrgica en el pasado, 2. Planificación quirúrgica actual)

9.2. Aplicación clínica y resultados

Los modelos 3D utilizados en la planificación quirúrgica en diversas áreas han demostrado mejoras sustanciales en la precisión y eficiencia de dicho proceso. En particular, se ha observado una marcada reducción en la duración de las intervenciones quirúrgicas, una disminución notable de las complicaciones intraoperatorias y una mejora global en los resultados posoperatorios. Estos hallazgos respaldan de manera concluyente la utilidad clínica de los modelos 3D en la planificación quirúrgica de las cardiopatías congénitas. [35](#)

Este enfoque les brinda una comprensión más profunda de las patologías con las que se enfrentan. Anteriormente, su principal recurso se limitaba a las imágenes radiológicas, las cuales, aunque proporcionan información valiosa, pueden resultar sumamente complejas de interpretar para aquellos médicos que no se especializan en radiología. Sin embargo, los modelos 3D ofrecen una visualización mucho más clara de las anomalías cardíacas y simplifican de manera significativa el proceso de toma de decisiones clínicas.

Los modelos 3D para la planificación quirúrgica no se limitan únicamente a su impresión física; también ofrecen la posibilidad de ser empleados en entornos virtuales o de realidad aumentada. Esta versatilidad tecnológica brinda a los equipos médicos y cirujanos la capacidad de explorar, analizar y practicar procedimientos quirúrgicos de manera virtual antes de ingresar al quirófano. A través de estas representaciones virtuales, se pueden simular condiciones específicas del paciente y evaluar diversas estrategias quirúrgicas, lo que contribuye a una planificación más precisa y a la mejora de la seguridad en el quirófano. Además, la realidad aumentada permite la superposición de información digital sobre la vista en tiempo real, lo que proporciona a los cirujanos una valiosa guía visual durante la cirugía en sí. Esta combinación de capacidades físicas e inmersivas representa un avance significativo en la planificación y ejecución de procedimientos quirúrgicos. En la Figura 51 es posible apreciar

como se ven los defectos congénitos del paciente en el modelo virtual.

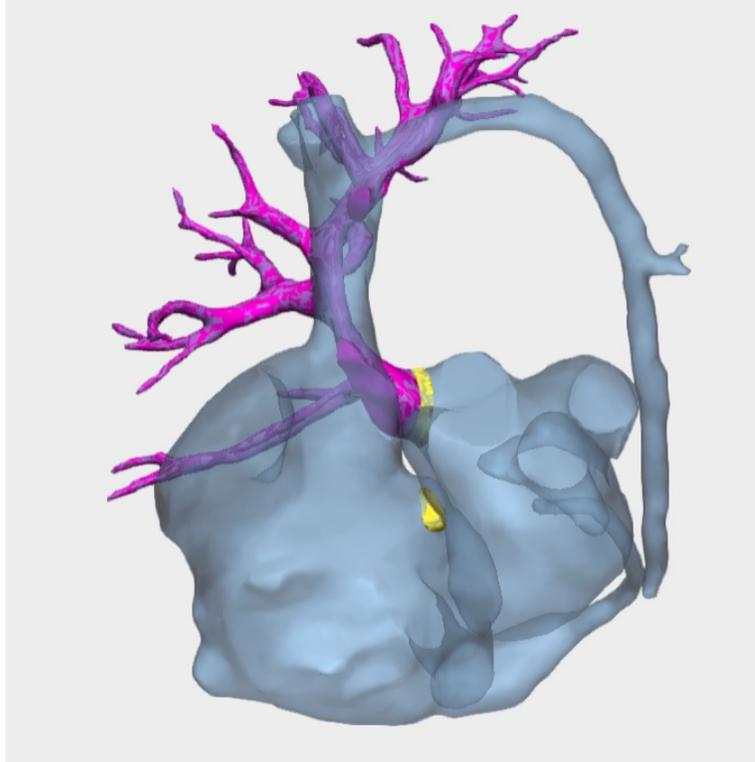


Figura 51: Modelo virtual (Vista de defectos congénitos) [22]

A lo largo de este trabajo, se han seguido varias fases previamente descritas, pero es crucial destacar que la colaboración de un equipo multidisciplinario es fundamental en la creación de estos modelos. Además, la experiencia adquirida en cada iteración ha demostrado ser invaluable para mejorar continuamente el proceso. Durante la etapa de impresión, se identificaron desafíos significativos, como la falta de ajuste entre algunas piezas, a pesar de mantener las dimensiones originales de los archivos STL. Este problema se originó debido a la similitud de tamaño entre los ventrículos y el miocardio, junto con algunas estructuras intrincadas que afectaron el ensamblaje. Además, se observó que la elaboración de cavidades huecas, como en el caso de la arteria pulmonar, es preferible para asegurar estabilidad, ya que una pieza más pesada puede dificultar el ensamblaje adecuado con otras estructuras circundantes.

La presentación del modelo a cirujanos cardiovasculares expertos fue enriquecedora, ya que su experiencia en cirugías cardíacas aportó valiosas opiniones y sugerencias al modelo. Observar cómo el modelo se utilizó durante la cirugía robótica también fue una experiencia excepcional. Los cirujanos encontraron sumamente útil visualizar tanto la realidad virtual como la realidad aumentada del modelo mientras llevaban a cabo el procedimiento, lo que facilitó y guió de manera efectiva la realización de la cirugía. Este hecho resalta el potencial que estos modelos tienen para mejorar y facilitar procedimientos quirúrgicos, ofreciendo una herramienta valiosa para los profesionales médicos durante sus intervenciones.

9.3. Limitaciones y posibilidades futuras

La creación manual de modelos 3D es un proceso que requiere de un esfuerzo y tiempo considerable. Esta demora puede ser desventajosa, especialmente cuando se necesita un modelo de forma urgente para un paciente que requiere una intervención rápida. Además, es importante señalar que la segmentación manual de modelos puede llevar a diferencias entre las segmentaciones realizadas por diferentes personas para el mismo modelo. Además, el costo asociado a esta tecnología, que incluye la adquisición de una impresora 3D y el esfuerzo considerable involucrado en el proceso, también debe ser considerado.

En un futuro, la incorporación de algoritmos de IA en esta área revolucionará el proceso de creación de modelos 3D en varios aspectos significativos. En primer lugar, la IA puede automatizar gran parte del trabajo manual necesario para segmentar las imágenes médicas y construir el modelo tridimensional [36]. Sin embargo, los algoritmos de IA dependen mucho de como sean entrenados y aún no están validados para su uso completo en la medicina.

En este trabajo, se empleó el software 3D Slicer, el cual, a pesar de contar con funciones para la segmentación, no ofrece una precisión absoluta en este proceso. La segmentación automática de 3D Slicer requiere una revisión minuciosa debido a su falta de exactitud, siendo necesario verificar manualmente cada detalle para garantizar la corrección y adaptación precisa a la anatomía del paciente. Como resultado, el modelo generado a partir de esta segmentación suele presentar una textura áspera y áreas rugosas que, al finalizar, requieren un proceso adicional de suavizado y texturizado. Esta etapa adicional puede introducir mínimas modificaciones en la pieza, lo que puede generar discrepancias durante el ensamblaje, tal como ocurrió en este caso específico. Además, al imprimir el modelo en un material rígido, las estructuras originalmente más flexibles pueden enfrentar dificultades para encajar adecuadamente.

La constante elaboración de estos modelos proporciona una oportunidad invaluable para aprender de los errores y perfeccionar los métodos futuros. Este enfoque continuo hacia la mejora se traduce en modelos 3D más precisos y fiables, lo que directamente beneficia a los pacientes al ofrecer una planificación quirúrgica más certera. Además, esta evolución constante tiende a simplificar el proceso con el tiempo, permitiendo su realización en lapsos más cortos. Esta agilidad en la creación de modelos resulta crucial en situaciones urgentes o cuando se requiere una toma de decisiones quirúrgicas rápida y precisa.

Durante el proceso de impresión, es fundamental considerar el tipo de impresora, el material utilizado y el tamaño del extrusor empleado. En este caso, se utilizó un extrusor de 0.4 mm para las piezas grandes y uno de 0.2 mm para aquellas más pequeñas o con detalles precisos. Sin embargo, al obtener las piezas impresas, se observó que muchas de ellas, especialmente las partes que representaban las vasculaturas, requerían una cantidad significativa de soportes. Retirar estos soportes fue una tarea que demandó un tiempo considerable, especialmente teniendo en cuenta que las estructuras vasculares son delicadas y finas. Este proceso implicó el riesgo de fracturar algunas ramificaciones, lo cual ocurrió en algunos casos y requirió reparaciones posteriores con pegamento para restaurar la integridad de las piezas.

Se documentó una cirugía que empleó un modelo 3D distinto al creado en este proyecto. Además, se presentó el modelo desarrollado en este trabajo a cirujanos cardiovasculares.

En ambos casos, los médicos confirmaron que el uso de estos modelos beneficia tanto la planificación quirúrgica como la ejecución de la cirugía. Este trabajo constituye un testimonio elocuente del potencial transformador de la ingeniería biomédica en el campo de la medicina. A medida que se avance en esta dirección, se vislumbra un futuro en el que la tecnología y la colaboración interdisciplinaria se fusionen para elevar aún más la calidad de vida de los pacientes que enfrentan cardiopatías congénitas y otras condiciones médicas. Este trabajo representa un hito en ese viaje y demuestra el potencial de la innovación en el ámbito de la salud.

- El diseño y fabricación de un modelo 3D anatómicamente correcto de un corazón con una cardiopatía congénita representa un avance significativo en la planificación quirúrgica en cirugías cardiovasculares. Este modelo proporciona a los cirujanos una representación precisa y tangible de la anatomía cardíaca afectada, lo que les permite estudiar y comprender mejor la complejidad de la cardiopatía antes de la intervención quirúrgica.
- La descripción detallada del proceso de creación del modelo 3D anatómicamente preciso es esencial para garantizar la precisión y la utilidad clínica del modelo. Este enfoque meticuloso en la creación del modelo establece una base sólida para su aplicación en la planificación quirúrgica.
- La selección y el corrección de imágenes médicas de pacientes con cardiopatía congénita son fundamentales para la obtención de datos precisos y la representación fiel de la anatomía cardíaca.
- El uso de softwares, como 3D Slicer, demuestra la importancia de las herramientas de software especializadas en la creación de modelos 3D anatómicamente precisos. Estas aplicaciones permiten la segmentación y el refinamiento detallado de las imágenes médicas, asegurando la fidelidad anatómica del modelo.
- La impresión, procesamiento y ensamblaje precisos del modelo 3D son esenciales para garantizar que sea una réplica exacta de la anatomía del paciente. La entrega exitosa de este modelo al equipo quirúrgico es un hito crucial en el proceso.
- La documentación exhaustiva de todo el proceso de planificación quirúrgica y la aplicación clínica del modelo 3D proporciona una valiosa retroalimentación sobre la utilidad y efectividad de esta tecnología en la práctica médica. Esta documentación puede ayudar a mejorar aún más la planificación y ejecución de futuras cirugías cardiovasculares, aumentando así la calidad de la atención médica.

- Diseñar e integrar algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) en la creación de modelos 3D para planificación quirúrgica en medicina. La IA automatiza el proceso, ahorra tiempo, reduce errores humanos y mejora la precisión. Además, la IA puede aprender y volverse más precisa con el tiempo, beneficiando a los pacientes con modelos 3D más confiables. También, la rapidez de la IA es crucial en situaciones de emergencia. Sería recomendable llevar un curso de Inteligencia artificial para biomédica, en el que pueda dar un introducción de cómo desarrollar este tipo de algoritmos.
- Contar con la disponibilidad de los materiales adecuados para llevar a cabo este tipo de impresiones 3D. Además, el uso de impresoras especializadas que permitan la impresión sin limitaciones y con una precisión excepcional. Como estudiantes de biomédica es importante tener un entrenamiento en impresión 3D, para lograr el adecuado manejo de las piezas, facilitar la elección de los materiales y conocer las técnicas de impresión que más se adapten al objetivo deseado.
- Promover el Uso de la Tecnología de Modelado 3D en la Planificación Quirúrgica: Se sugiere que en la universidad, posiblemente como parte de los cursos electivos, se brinde capacitación a los estudiantes sobre las técnicas necesarias para la creación de modelos 3D anatómicamente precisos como una práctica estándar en la planificación quirúrgica. Esto puede tener un impacto significativo en la comprensión de la anatomía, tanto para los futuros ingenieros biomédicos que los construyan como para los médicos, lo que mejorará la toma de decisiones durante las cirugías. Además, el conocimiento de estas técnicas permitirá que alguien pueda dar continuidad a proyectos similares a éste, en el futuro.
- Impartir un curso específico de anatomía e incentivar a los estudiantes a involucrarse en la creación de modelos 3D anatómicamente precisos para lograr la implementación de esta tecnología en el país y beneficiar a un mayor número de pacientes. Al fomentar y respaldar la participación activa de los estudiantes en proyectos de modelado 3D, se les proporciona una oportunidad invaluable para adquirir habilidades prácticas y experiencia en el campo de la medicina y la ingeniería biomédica.

- Fomentar la colaboración interdisciplinaria entre estudiantes de diferentes disciplinas, como la medicina y la ingeniería biomédica, para que juntos puedan generar soluciones más creativas y efectivas para desafíos médicos complejos. Esta iniciativa no solo fortalecerá la formación académica de los estudiantes, contribuirá al avance de la atención médica en el país, mejorando la atención brindada a los pacientes.

- [1] E. N. Gomes, R. R. Dias, B. A. Rocha et al., “Use of 3D printing in preoperative planning and training for aortic endovascular repair and aortic valve disease,” *Brazilian journal of cardiovascular surgery*, vol. 33, págs. 490-495, 2018.
- [2] A. Tejo-Otero, I. Buj-Corral y F. Fenollosa-Artés, “3D printing in medicine for pre-operative surgical planning: a review,” *Annals of biomedical engineering*, vol. 48, n.º 2, págs. 536-555, 2020.
- [3] L. Á. R. Romero, A. G. Mandiola, M. L. Serrano, R. V. Sánchez, R. G. Fernández y M. L. Ferreras, “Aplicaciones de la impresión 3D en Cardiología y Cirugía Cardiovascular: la experiencia en nuestro centro,” *Seram*, vol. 2, n.º 1, 2018.
- [4] B. A. Gamez del M, C. Montoya M, L. F. Puelma C, E. G. Buckel G, N. Jarufe C et al., “Modelo de impresión 3D para planificación quirúrgica en trasplante hepático con donante vivo adulto-adulto,” *Revista de cirugía*, vol. 74, n.º 2, págs. 208-214, 2022.
- [5] P. Endocirugia, *Tecnologías Avanzadas de Modelado 3D Para Planificación Quirúrgica*, nov. de 2022. dirección: <https://endocirugia.prim.es/tecnologias-avanzadas-de-modelado-3d-de-cella-medical-solutions/>.
- [6] P. Leite, *Paho/who: Health indicators: Conceptual and Operational Considerations (section 3)*, jun. de 2018. dirección: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14406%3Ahealth-indicators-conceptual-and-operational-considerations-section-3&Itemid=0&limitstart=3&lang=en.
- [7] R. Cano-Zárate, E. K. Hernández-Barajas, H. H. Hernández-Barajas, A. Meave-González y N. Espínola-Zavaleta, “Impact of 3D printing in surgical planning of congenital heart disease,” *Archivos de cardiología de México*, vol. 91, n.º 1, págs. 1-6, 2021.
- [8] G. C. Caballero, M. C. Alcázar, J. L. Menéndez et al., “Cirugía cardiovascular en España en el año 2020. Registro de intervenciones de la Sociedad Española de Cirugía Cardiovascular y Endovascular,” *Cirugía Cardiovascular*, vol. 29, n.º 4, págs. 207-220, 2022.

- [9] T. Suárez, “Comportamiento de la Mortalidad Neonatal. 2019 – 2020,” *Neonatología. Revista Oficial de la Federación Cubana de Neonatología.*, vol. 11, n.º 2, págs. 31-44, 2021.
- [10] S. E. Alvarado, H. Zerón-Coello, D. Saucedo-Acosta y D. R. Álvarez, “Complicaciones de Pacientes sometidos a Cirugía Cardiovascular, Hospital María, Especialidades Pediátricas,” *Honduras Pediátrica*, vol. 35, n.º 1, págs. 1-8, 2022.
- [11] I. Valverde, “Impresión tridimensional de modelos cardiacos: aplicaciones en el campo de la educación médica, la cirugía cardiaca y el intervencionismo estructural,” *Revista española de cardiología*, vol. 70, n.º 4, págs. 282-291, 2017.
- [12] I. Rivero Belenchón, “Ensayo clínico multicéntrico NCT03738488: modelos anatómicos 3D versus imágenes radiológicas para planificación quirúrgica en pacientes con cáncer de células renales y trombo tumoral vascular,” 2023.
- [13] G. Tortora, *Principios de Anatomía y Fisiología Tortora, Derrickson 13.*
- [14] E. Hall, “El sentido de la audición,” *Guyton y Hall Tratado de Fisiología Médica. 13th ed. Mississippi: ELSEVIER*, págs. 1660-86, 2016.
- [15] C. E. Torres-Romacho, V. G. Uriondo-Ore, A. J. Ramirez-Palomino et al., “Factores asociados a la supervivencia al año de vida en neonatos con cardiopatía congénita severa en un Hospital Nacional de Perú,” *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, vol. 36, n.º 3, págs. 433-441, 2019.
- [16] T. S. Sørensen, H. Körperich, G. F. Greil et al., “Operator-independent isotropic three-dimensional magnetic resonance imaging for morphology in congenital heart disease: a validation study,” *Circulation*, vol. 110, n.º 2, págs. 163-169, 2004.
- [17] H. P. Bitar, “Evaluación cardiaca con tomografía computada y resonancia magnética,” *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 24, n.º 1, págs. 54-62, 2013.
- [18] R. Díaz-Navarro, D. Silva González y C. Henríquez-Roldán, “Valor de la resonancia magnetica cardíaca para el diagnóstico diferencial en pacientes con sospecha de infarto agudo de miocardio con elevación del segmento ST y arterias coronarias normales,” *Revista médica de Chile*, vol. 148, n.º 10, págs. 1406-1417, 2020.
- [19] B. Zitova y J. Flusser, “Image registration methods: a survey,” *Image and vision computing*, vol. 21, n.º 11, págs. 977-1000, 2003.
- [20] A. Fedorov, R. Beichel, J. Kalpathy-Cramer et al., *3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network*, nov. de 2012. dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3466397/>.
- [21] S. Mottl-Link, M. Hübler, T. Kühne et al., “Physical models aiding in complex congenital heart surgery,” *The Annals of thoracic surgery*, vol. 86, n.º 1, págs. 273-277, 2008.
- [22] Abr. de 2023. dirección: <https://www.cellams.com/tecnologia-3d/>.
- [23] V. Mironov, V. Kasyanov y R. R. Markwald, “Nanotechnology in vascular tissue engineering: from nanoscaffolding towards rapid vessel biofabrication,” *Trends in biotechnology*, vol. 26, n.º 6, págs. 338-344, 2008.
- [24] J. H. Daemen, S. Heuts, J. R. Olsthoorn, J. G. Maessen y P. Sardari Nia, “Mitral valve modelling and three-dimensional printing for planning and simulation of mitral valve repair,” *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, vol. 55, n.º 3, págs. 543-551, 2019.

- [25] J. NEGRILLO CÁRDENAS, “Aplicaciones de la Realidad Virtual y Realidad Aumentada en Medicina: Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación,” 2023.
- [26] P. B. Dydynski, C. Kiper, D. Kozik, B. B. Keller, E. Austin y B. Holland, “Three-dimensional reconstruction of intracardiac anatomy using CTA and surgical planning for double outlet right ventricle: early experience at a tertiary care congenital heart center,” *World Journal for Pediatric and Congenital Heart Surgery*, vol. 7, n.º 4, págs. 467-474, 2016.
- [27] W. T. Mahle, R. Martinez, N. Silverman, M. S. Cohen y R. H. Anderson, “Anatomy, echocardiography, and surgical approach to double outlet right ventricle,” *Cardiology in the Young*, vol. 18, n.º S3, págs. 39-51, 2008.
- [28] Dirección: <https://www.cdc.gov/ncbddd/spanish/heartdefects/dvpat.html>.
- [29] Y. H. MgSc, M. V. MgSc, M. Atilio Del Mar et al., “Imagenología médica: Fundamentos y alcance Medical Imaging: Foundations and Scope,” *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, vol. 35, n.º 3, pág. 71, 2016.
- [30] T. Möller y E. Reif, *Pocket Atlas of Sectional Anatomy: Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging* (Basic sciences v. 1). Thieme, 2007, ISBN: 9783131255037. dirección: <https://books.google.bi/books?id=Xp8cnwEACAAJ>.
- [31] Dirección: https://slicer.readthedocs.io/en/latest/user_guide/registration.html#manual-registration.
- [32] Dirección: <https://www.slicer.org/wiki/Documentation/Nightly/Training#Segmentation>.
- [33] B. Foundation, *Home of the blender project - free and open 3D creation software*. dirección: <https://www.blender.org/>.
- [34] Dirección: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/EME/APB/APB01/es_EME_APB01_Contenidos/website_31_los_planos_anatmicos.html.
- [35] R. Cano-Zárate, E. K. Hernández-Barajas, H. H. Hernández-Barajas, A. Meave-González y N. Espínola-Zavaleta, “Efectos de la impresión 3D en la planificación quirúrgica de las cardiopatías congénitas,” *Archivos de cardiología de México*, vol. 91, n.º 1, págs. 1-6, 2021.
- [36] D. Iglesias López, “Impacto de la Inteligencia Artificial en la Radiología,” *Revista Cubana de Informática Médica*, vol. 15, n.º 1, 2023.

Anomalías congénitas: Órgano que mide aproximadamente 12 cm de largo, 9 cm en su punto más ancho y 6 cm de espesor, con un peso promedio de 250 g en mujeres adultas y de 300 g en hombres adultos.. [13](#)

Cayado aórtico: Porción superior de la arteria principal que transporta sangre fuera del corazón.. [11](#)

Ciclo cardíaco: Secuencia de eventos que ocurren desde un latido hasta el siguiente.. [11](#)

Corazón: Órgano que mide aproximadamente 12 cm de largo, 9 cm en su punto más ancho y 6 cm de espesor, con un peso promedio de 250 g en mujeres adultas y de 300 g en hombres adultos.. [9](#)

Cuerdas tendinosas: Estructuras con forma de filamentos, cuyo tejido es de carácter fibroso, y se encargan de unir la superficie ventricular y el borde libre de las valvas con los músculos papilares, y, por consecuencia, con la pared posterior del ventrículo izquierdo.. [10](#)

Diafragma: Músculo delgado ubicado debajo de los pulmones y el corazón, que separa el tórax del abdomen.. [9](#)

Diástole: Movimiento de relajación y expansión del corazón y las arterias que se produce cuando la sangre purificada entra en ellas.. [11](#)

Endocardio: Membrana que recubre el interior de las cavidades del corazón.. [9](#)

Epicardio: Capa epitelial unicelular externa del corazón, que recubre el miocardio.. [9](#)

Mediastino: Espacio medio de la caja torácica, entre las dos pleuras, la columna vertebral y el esternón.. [9](#)

Miocardio: Gruesa capa muscular del medio, que permite que las cámaras del corazón se contraigan y se relajen para bombear sangre al cuerpo.. [9](#)

Tabique interauricular: Delgada pared que separa las aurículas.. 9

Tabique interventricular: Pared que separa los ventrículos.. 11