

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Viabilidad del uso de Imágenes Médicas como Herramienta
para la Digitalización de Corazones en Tres Dimensiones**

Trabajo de graduación presentado por Ricardo Miranda Prado para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Viabilidad del uso de Imágenes Médicas como Herramienta
para la Digitalización de Corazones en Tres Dimensiones**

Trabajo de graduación presentado por Ricardo Miranda Prado para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2020

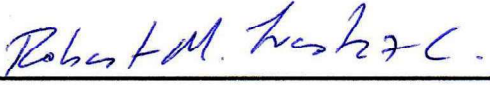
Vo.Bo.:

(f) 
Dr. Favio Reyna Carrera

Tribunal Examinador:

(f) 
Dr. Favio Reyna Carrera

(f) 
MSc. Carlos Esquit

(f) 
Sc. Robert Fuertez

Fecha de aprobación: Guatemala, 15 de Junio de 2020.

	Lista de figuras	VIII
	Lista de cuadros	IX
	Resumen	XI
	Abstract	XIII
I	Introducción	1
II	Antecedentes	3
	A EchoPixel	3
	B Corazones personalizados por MIT y Boston Children’s Hospital	4
III	Justificación	5
IV	Objetivos	7
	A Objetivo general	7
	B Objetivos específicos	7
V	Alcance	9
VI	Marco teórico	11
	A Anatomía general del corazón	11
	1 El corazón y su ubicación	11
	2 Cámaras cardíacas	11
	3 Dimensiones promedio del corazón	13
	B Ecocardiografía	14
	1 Ondas ultrasónicas	14
	2 Efecto doppler	14
	3 Transductor	15
	4 Ultrasonido de tejido	15
	5 Definición de ecocardiografía	16
	C Philips EPIQ 7G	18

D	Digital Imaging and Communications in Medicine	19
E	Algoritmos de filtrado	19
F	Archivos <i>STL</i>	20
VII	Generación de archivos DICOM desde Philips EPIQ 7G	21
A	Obtención de archivos DICOM	21
B	Obtención de ecocardiografía de corazón completo	23
VIII	DICOM Cartesiano utilizando QLAB	25
A	Manipulación de archivo DICOM	25
B	Exportación en DICOM Cartesiano	27
IX	Modelaje en 3D	29
A	<i>Slicer Heart</i>	29
1	Obtención de archivos NRRD	30
B	Imagen médica en archivo <i>STL</i>	31
1	Aislar volumen relevante	31
2	Crear modelo 3D	33
3	Exportar <i>STL</i>	35
X	Modelaje utilizando tomografías computarizadas -TC-	37
A	Tomografía de baja resolución con cortes de 1mm sin medio de contraste . . .	37
B	Tomografía de alta resolución y corte de 5mm sin medio de contraste	38
C	Tomografía de alta resolución y corte de 0.6mm con medio de contraste . . .	39
XI	Conclusiones	47
XII	Recomendaciones	49
XIII	Bibliografía	51

1	Modelo 3D EchoPixel [25]	3
2	Impresión de corazón MIT [12]	4
3	Corazón [23]	12
4	Cavidades del corazón	13
5	Corazón con corte transversal [23]	14
6	Gráfica de onda ultrasónica [14]	14
7	Efecto doppler [9]	15
8	Ejemplo del funcionamiento de un transductor [16]	15
9	Representación de interacción de ondas ultrasónicas con tejido [16]	17
10	Ejemplos de ecocardiografía	17
11	Sistema completo de EPIQ 7G	18
12	EPIQ 7G	18
13	Ejemplo de imagen DICOM de cráneo [15]	19
14	Comparativa de distintas resoluciones de archivos <i>STL</i> [13]	20
15	EPIQ 7G [24]	21
16	Exportación completa de datos ecocardiográficos [2]	22
17	Modelo 3D sin extracción completa	22
18	Ecocardiografía 3D sin alterar	23
19	Pantalla principal QLAB	25
20	Selección de archivo DICOM y aplicación 3DQ	26
21	Archivo DICOM	26
22	Seleccionar exportar imagen	27
23	DICOM Cartesiano	27
24	<i>Slicer Heart</i>	30
25	Extracción de archivos DICOM y NRRD	30
26	Importar NRRD	31
27	<i>Volume Rendering</i>	32
28	Selección de volumen	32
29	Volumen final	33
30	Selección de áreas en <i>Editor</i>	33
31	Creación de modelo	34
32	Creación de modelo 3D	34
33	Modelo 3D	35

34	Exportar modelo	35
35	Exportar modelo en formato <i>STL</i>	35
36	Ejemplo de tomografía computarizada de tórax [21]	38
37	Tomografía de baja resolución con corte de 1mm sin medio de contraste . . .	38
38	Modelo de tomografía de baja resolución	39
39	Tomografía de alta resolución con corte de 5mm sin medio de contraste	40
40	Modelo de tomografía de alta resolución corte 5mm	41
41	Tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ventrículo derecho	42
42	Modelo de cavidades de corazón con tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ventrículo derecho	43
43	Modelo de corazón completo con tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ventrículo derecho	44
44	Tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ambas cavidades	45
45	Modelo de corazón completo con tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ambas cavidades	46

Lista de cuadros

1 Impedancia acústica de distintos medios [5] 16

Este proyecto se enfocó en la viabilidad para modelar corazones en tres dimensiones -3D- utilizando como base imágenes médicas obtenidas del sistema ultrasónico *EPIQ 7G* de *Philips* y los archivos tomográficos de alta resolución obtenidos del sistema *Somatom* de 64 cortes de *Siemens*. Las imágenes médicas utilizadas se obtuvieron exportándolas en su máxima resolución desde sus respectivas máquinas. En el caso de las tomografías se utilizaron imágenes con medio de contraste, este permitió resaltar los detalles del interior de los corazones al igual que sus cavidades. Se utilizó la herramienta de *Slicer3D* la cual permitió la visualización y modelaje del histograma de densidades con lo cual se realizaron los modelos en 3D. Estos luego fueron exportados en formato *STL* desde el mismo programa, de tal forma que pudieran ser manipulados digitalmente y posteriormente impresos con el objetivo de brindar a los médicos una experiencia de abordaje prequirúrgica y servir como un modelo de enseñanza anatómica. La implementación consiste en el procesamiento digital de los archivos médicos, filtrando todo aquello que no proporcione información relevante, obteniendo los contornos del corazón formando así un modelo en 3D. Según los resultados obtenidos, se concluyó que la mejor metodología es aquella que utiliza las imágenes médicas obtenidas de las tomografías de alta resolución, debido a la calidad de las imágenes y cantidad de información relevante que se puede extraer para el modelaje de corazones.

This project focused on the adaptation of echocardiographic studies obtained from the *Philips* machine, *EPIQ 7G*, and high-resolution tomographic files so that they could be transformed into three-dimensional models -3D-. The medical images used were obtained exporting at full resolution from their respective machines. In the case of the tomographic images, it was used a contrast medium, this allowed to highlight the hearts cavities details. Slicer3D tool was used, which allowed visualizing the images and modifying the density histogram helping to build the 3D model. These models were exported in *STL* format from the same program so that they could be digitally manipulated and subsequently printed. The implementation consists of the digital process of medical files, everything that does not provide relevant information it is filtered, obtaining the heart contours thus forming a 3D model. According to the results obtained, it was concluded that the best methodology uses medical images obtained from high-resolution tomographs, due to the images quality and the amount of relevant information that can be extracted for the hearts modeling.

La presente investigación se enfoca en la viabilidad para modelar corazones en tres dimensiones utilizando de base imágenes ecocardiográficas obtenidas del sistema ultrasónico *EPIQ 7G* de *Philips* y archivos tomográficos de alta resolución obtenidos del sistema *Somatom* de 64 cortes de *Siemens*. Esto con el objetivo de brindarle a los médicos una alternativa que les permita realizar prácticas antes de una operación crítica, minimizando los tiempos de operación y posibles problemas que puedan surgir durante la cirugía.

La carácter principal de esta investigación es verificar la viabilidad de utilizar distintos tipos de imágenes médicas para el modelaje corazones. El problema principal de utilizar tanto resonancias magnéticas como tomografías radica en el precio elevado de los mismos. De tal forma que se busca determinar la viabilidad de utilizar archivos ultrasónicos como método de modelaje digital.

A. EchoPixel

El modelaje de órganos en tres dimensiones utilizando diferentes tipos de imágenes médicas ha permitido el desarrollo de distintas compañías a lo largo de los años. Este es el caso de EchoPixel, una empresa enfocada en el desarrollo del modelaje de corazones en realidad virtual utilizando ecocardiografías, resonancias magnéticas y tomografías. EchoPixel tiene el objetivo de revolucionar lo que ellos llaman el *arte* de la cirugía moderna, buscan brindar a los doctores una alternativa más eficiente con la cual ellos puedan planificar de mejor manera sus operaciones utilizando la realidad virtual [25].

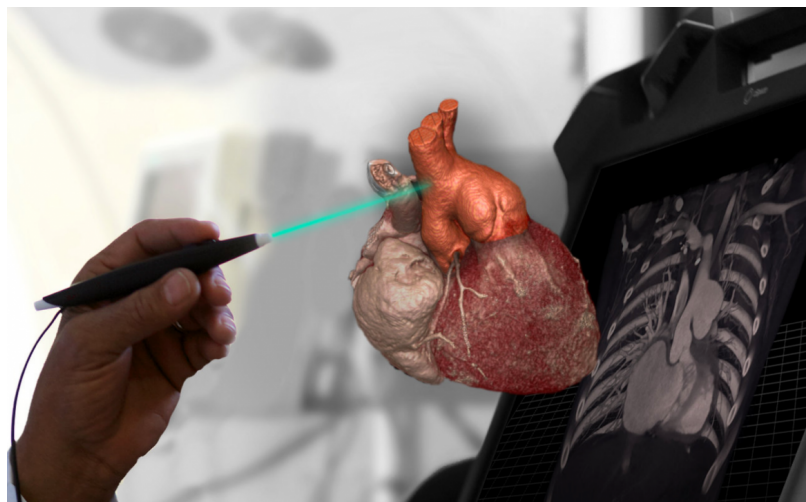


Figura 1: Modelo 3D EchoPixel [25]

En el caso de la ecocardiografía EchoPixel utiliza el sistema ultrasónico de Philips EPIQ 7, el cual brinda la posibilidad de obtener imágenes ecocardiográficas en tres dimensiones. El objetivo es poder realizar mediciones y analizar cuantitativa y cualitativamente la válvula

mitral del paciente. Generalmente estos análisis son realizados utilizando la herramienta QLAB de Philips que tiene la desventaja de no ser completamente fiable en términos de medición del tamaño de las estructuras vistas en las imágenes ultrasonográficas. Por lo cual su objetivo es utilizar *EchoPixel True 3D*, una herramienta tridimensional que los doctores puedan utilizar para prepararse de mejor manera para sus operaciones [3].

B. Corazones personalizados por MIT y Boston Children's Hospital

En el año 2015 el Instituto de Tecnología de Massachusetts -MIT- en conjunto con el Boston Children's Hospital desarrollaron un programa con el cual doctores del hospital pudieran obtener impresiones en tres dimensiones de los corazones de sus pacientes. El objetivo de este proyecto colaborativo fue el de darle a los doctores una forma tangible con la cual pudieran planificar de mejor manera sus cirugías [12].

La razón por la cual se inició este proyecto colaborativo es porque a diferencia de otros hospitales en Boston Children's Hospital los pacientes no tienen corazones de tamaños ni formas regulares por lo que la complejidad de las cirugías aumentaba exponencialmente. Por consiguiente se diseñó una metodología con la cual se obtuvieron modelos de corazones a partir de resonancias magnéticas -MRI-, de tal forma que estos pudieran ser impresos en cuestión de horas. La figura a continuación es un ejemplo de estas impresiones [12]



Figura 2: Impresión de corazón MIT [12]

Utilizando estos modelos y la información que proveen, los médicos puedan diseñar el plan quirúrgico. El objetivo a futuro es de comparar resultados de las operaciones actuales con las cirugías pasadas de tal forma que se identifique la relevancia que tiene el hecho de realizar estas impresiones.

Justificación

En la actualidad, al realizar una operación médica se llevan a cabo distintos estudios al paciente los cuales le permiten al médico ubicar una o varias anomalías. Esta información es utilizada para planificar la operación y luego efectuarla. El problema con esta metodología es que el médico solamente tiene una oportunidad para operar al paciente. Por lo cual, al tener procedimientos críticos, las cirugías pueden llegar a durar hasta 10 horas.

El objetivo de este proyecto es ayudar a los médicos brindándoles un modelo impreso en 3D, que ellos puedan manipular múltiples veces para poder planificar de mejor forma las cirugías del corazón. Para esto se pretende producir corazones impresos en 3D, los cuales estarán diseñados a partir de imágenes médicas del paciente realizadas previamente.

En el caso de este módulo en específico se espera demostrar que existe una forma para convertir archivos de ecocardiogramas o tomografías cardíacas en archivos manipulables para impresión 3D. Con esto se pretende brindar al médico una alternativa con la que pueda darle un mayor provecho a la información obtenida.

Se espera que esta forma de ver y manipular el corazón le permita al médico planificar de mejor forma sus cirugías. Se pretende que al ofrecerle al médico una alternativa con la que pueda practicar múltiples veces el procedimiento quirúrgico esto le permita facilitar la complejidad de la cirugía, reduciendo el tiempo quirúrgico.

A. Objetivo general

Convertir imágenes médicas en modelos en tres dimensiones con formato STL.

B. Objetivos específicos

- Identificar y entender el formato de los archivos que se obtienen de una ecocardiografía y una tomografía.
- Implementar un algoritmo de procesamiento de datos digitales que convierta imágenes médicas en archivos STL.
- Implementar un algoritmo que permita la eliminación de contenido no relevante en el modelo 3D.
- Realizar 10 pruebas de conversión en 3D exitosas verificadas por doctores.

Esta investigación pretende llevar las imágenes médicas, tomografías y ecocardiografías, obtenidas en un hospital a modelos en tres dimensiones que pueden ser vistos en cualquier dispositivo con visualizador 3D.

Para el desarrollo de esta propuesta se investigó sobre un programa de código abierto que pudiera ser utilizado para procesamiento de imágenes médicas. Habiendo resuelto esta problemática, se procesaron los archivos obtenidos creando modelos a partir del histograma de densidades. Los modelos fueron manipulados digitalmente reduciendo la cantidad de información no relevante en el archivo final.

Por último se compararon los resultados obtenidos de las tomografías y ecocardiografías determinando las ventajas y desventajas entre ambas metodologías.

A. Anatomía general del corazón

1. El corazón y su ubicación

El corazón es un órgano muscular que se encarga principalmente de bombear sangre a través del sistema cardiovascular, brindando oxigenación y nutrientes a los distintos tejidos del cuerpo humano así como favoreciendo la eliminación de sus desechos. Este se encuentra ubicado en el tórax, dentro del mediastino visceral. Tiene tres superficies: en la región anterior se encuentra la superficie esternocostal, inferiormente la superficie diafragmática y a los lados la superficie pulmonar [7].

2. Cámaras cardíacas

El corazón se encuentra dividido en cuatro cámaras o cavidades cardíacas que reciben y bombean sangre a todo el cuerpo. Estas están compuestas por dos aurículas o cámaras superiores y dos ventrículos o cámaras inferiores. Las aurículas son las encargadas de recibir la sangre y los ventrículos se encargan de eyectar la sangre a su ubicación correspondiente [22].

Aurícula derecha

Esta se encarga recibir la sangre desoxigenada proveniente de todo el cuerpo. Esta sangre proviene de la vena cava superior e inferior así como del seno coronario. Posteriormente de su recolección, la sangre desoxigenada pasa a través de la válvula tricúspide al ventrículo derecho. Al hablar de las válvulas cardíacas cabe resaltar que estas permiten el flujo unidireccional de la sangre comunicando las cavidades cardíacas. En el caso de la válvula tricúspide,

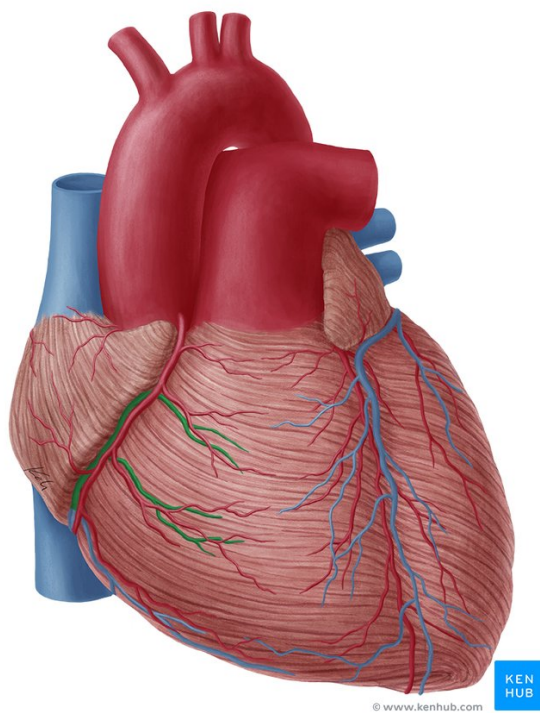


Figura 3: Corazón [23]

esta permite el flujo desde la aurícula derecha al ventrículo derecho. Al cerrarse la válvula esta impide el flujo retrógrado de la sangre a la aurícula [22].

Ventrículo derecho

Posteriormente se encuentra el ventrículo derecho, este se encarga de transportar la sangre hacia los pulmones. Para ello la sangre pasa a través del cono arterial, luego a través de la válvula pulmonar llegando así al tronco de la arteria pulmonar distribuyendo la sangre en dos arterias pulmonares principales que transportan la sangre a cada uno de los pulmones (cabe resaltar que las arterias siempre llevan sangre fuera del corazón). De esta manera la sangre desoxigenada llega a los capilares pulmonares donde sucede el intercambio gaseoso, llenando la hemoglobina de oxígeno y liberando el dióxido de carbono proveniente del metabolismo del organismo [22].

Aurícula izquierda

En el caso de la aurícula izquierda o también conocida como el atrio izquierdo esta se encarga de recolectar la sangre oxigenada proveniente de las venas pulmonares para que esta luego sea trasladada al ventrículo izquierdo por medio de la válvula mitral o bicúspide. Esta válvula se encarga de permitir el flujo unidireccional de sangre entre ambas cavidades [22].

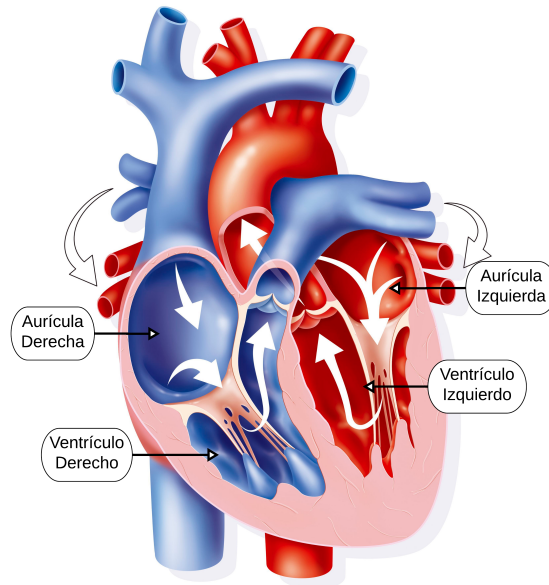


Figura 4: Cavidades del corazón

Ventrículo izquierdo

A continuación se encuentra el ventrículo izquierdo, el cual al recibir la sangre oxigenada proveniente de la aurícula izquierda la envía al resto del cuerpo por medio de la arteria más grande del cuerpo: la aorta. Para esto, al igual que la válvula mitral, se utiliza la válvula aórtica que es la encargada de permitir el paso de sangre oxigenada entre el ventrículo izquierdo y la aorta. La sangre luego es transportada al resto del cuerpo a través de las ramas principales de la aorta. Durante el proceso de contracción la válvula se abre permitiendo el paso de la sangre y por el contrario se cierra al relajarse o dilatarse [22].

3. Dimensiones promedio del corazón

El corazón tiene una forma de pirámide cuadrangular, orientado de tal forma que parezca que la pirámide cayera sobre uno de sus lados tal que su base apunte a la pared torácica posterior y su vértice hacia la anterior [23]. En el caso de un adulto sano promedio el corazón mide aproximadamente 12cm de largo, 8cm de ancho y 6cm de espesor. Al hablar de peso, por un lado el corazón de los hombres puede pesar entre 300 y 350 gramos. Mientras que el corazón de una mujer puede pesar entre 250 y 300 gramos [4].

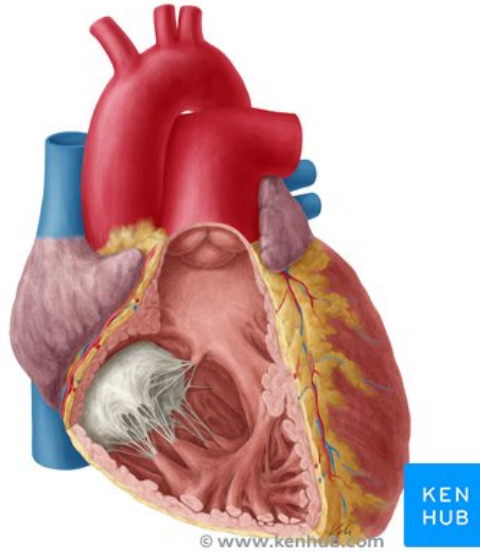


Figura 5: Corazón con corte transversal [23]

B. Ecocardiografía

1. Ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas son definidas como vibraciones mecánicas las cuales inducen una refracción o compresión alternativa en cualquier medio en el que pasan como puede verse en la siguiente figura, donde: La frecuencia, f , está representada como el número de ondas ultrasónicas que existen en un intervalo de un segundo. Lambda λ es la distancia entre picos de la onda. La amplitud es la altura de la misma, medida en decibeles (dB) y la velocidad de propagación de la onda es la velocidad a la cual la onda se traslada en el medio [14].

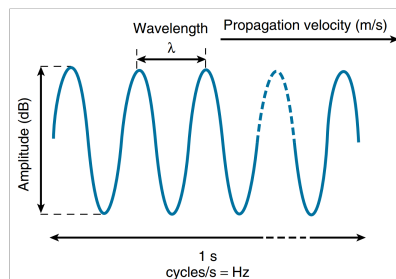


Figura 6: Gráfica de onda ultrasónica [14]

2. Efecto doppler

El efecto doppler se refiere al fenómeno producido cuando una onda de sonido o radio se traslada de un objeto a otro puede parecer que esta cambia su longitud de onda según la

distancia entre ambos objetos. Un ejemplo de esto es la sirena de una ambulancia que puede verse en la figura a continuación.

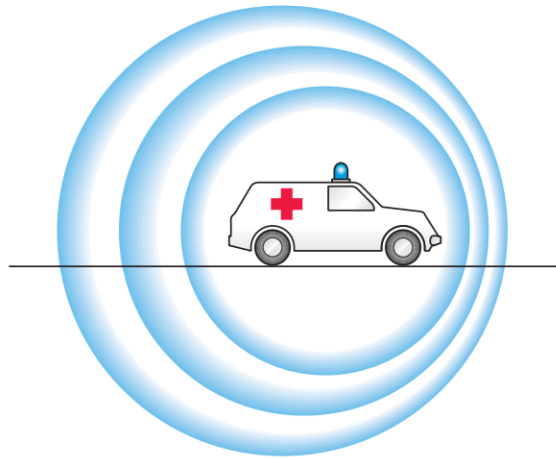


Figura 7: Efecto doppler [9]

3. Transductor

El transductor es un dispositivo encargado de convertir cualquier señal física en otra de un sistema distinto, de esta forma se pueden interpretar variables de sólo un tipo. Un gran ejemplo de esto es el transductor ultrasónico el cual convierte la las señales ultrasónicas en señales eléctricas que al ser interpretadas por la computadora muestra imágenes de lo analizado .

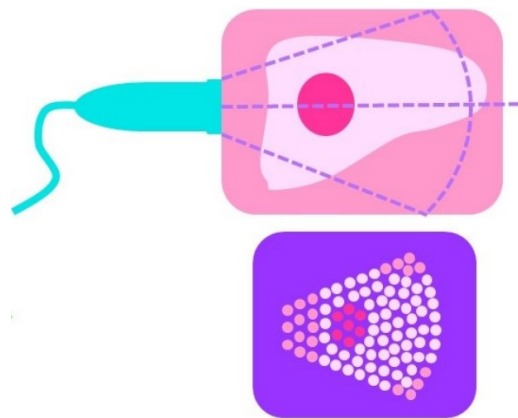


Figura 8: Ejemplo del funcionamiento de un transductor [16]

4. Ultrasonido de tejido

Un ultrasonido de tejido es definido cuando se propaga una onda ultrasónica dentro de un organismo generando imágenes ultrasónicas y datos doppler los cuales dependen del tipo

de tejido que se esté analizando ya que cada uno tiene una impedancia acústica distinta como puede verse en el cuadro a continuación.

<i>Tejido del cuerpo humano</i>	<i>Impedancia acústica 10^6 Rayl</i>
<i>Aire</i>	0.0004
<i>Pulmón</i>	0.18
<i>Grasa</i>	1.38
<i>Sangre</i>	1.61
<i>Músculo</i>	1.70
<i>Hueso</i>	7.80
<i>Promedio de tejido suave</i>	7.80

Cuadro 1: Impedancia acústica de distintos medios [5]

La impedancia acústica Z depende de la velocidad de propagación del medio c y la densidad del tejido ρ [14].

$$Z = c * \rho \tag{1}$$

La diferencia que tiene la impedancia acústica de cada tejido radica principalmente en la reflexión de las ondas ultrasónicas en la superficie del tejido. Esta interacción puede descrita según las siguientes características [14]:

- **Reflexión:** Es la base para la generación de imágenes producidas con ultrasonido ya que parte de la señal original retorna al transductor después de ser reflejada en el tejido. La cantidad de ultrasonido reflejado se basa el ángulo de reflexión y la diferencia en impedancia acústica entre dos tejidos.
- **Refracción:** Se define como la deflexión de las ondas ultrasónicas debido a diferencias en impedancia acústica. Este efecto es análogo a la refracción de la luz según los distintos lentes cóncavos o convexos.
- **Atenuación:** Pérdida de amplitud de la señal debido a que el tejido absorbió progresivamente la energía de la onda ultrasónica convirtiéndola en energía en forma de calor.
- **Dispersión:** A diferencia de la reflexión esta es la la irradiación de ultrasónicos desde una estructura pequeña en múltiples direcciones debido a que la onda ultrasónica es más grande que la estructura contra la que se encuentra.

5. Definición de ecocardiografía

La ecocardiografía o ultrasonido de corazón es una prueba diagnóstica no invasiva comúnmente utilizada hoy en día la cual ofrece una imagen del corazón en movimiento. Esta

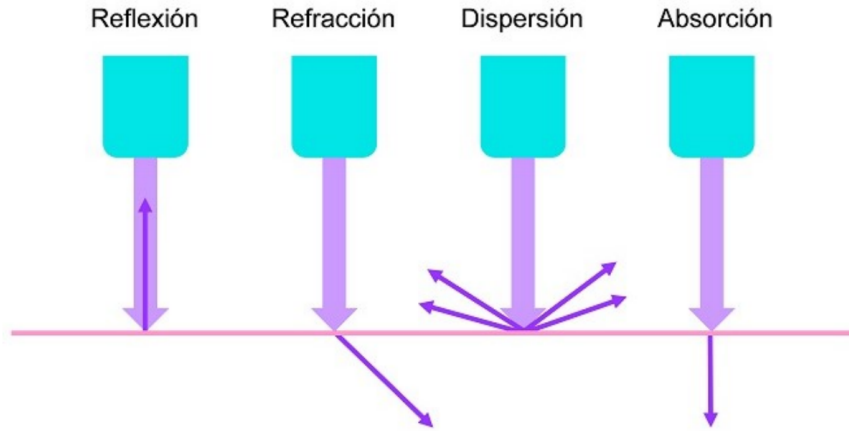
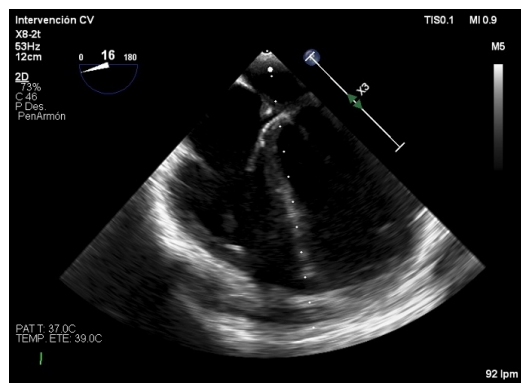


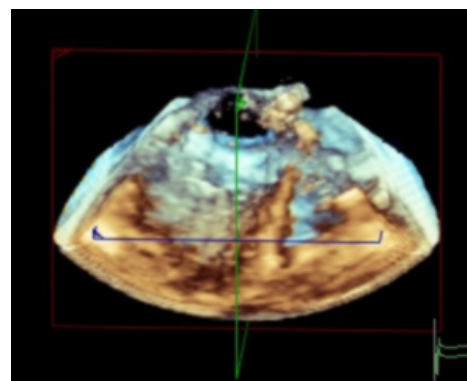
Figura 9: Representación de interacción de ondas ultrasónicas con tejido [16]

permite obtener la información de la forma, tamaño, fuerza del corazón, movimiento, funcionamiento y grosor de las paredes del órgano. Por otro lado aporta información sobre la circulación en el sistema respiratorio y la presión [1].

Para poder realizar estos análisis se utiliza un transductor sectorial, el cual permite captar las imágenes del corazón, una pantalla para visualizar las imágenes y una computadora que permite la manipulación y las mediciones de dichas imágenes. Cabe resaltar que estas imágenes pueden ser capturadas tanto en 2D como en 3D tal y como se muestra en la siguiente figura.



(a) Ecocardiografía 2D



(b) Ecocardiografía 3D

Figura 10: Ejemplos de ecocardiografía

El proceso con el cual se puede llevar a cabo una ecocardiografía es simplemente untando una gel conductora en el pecho del paciente y luego colocando el transductor en la misma ubicación. Este transductor se mueve alrededor del pecho captando distintas imágenes que luego serán analizadas en la computadora o en el sistema ultrasónico [1].

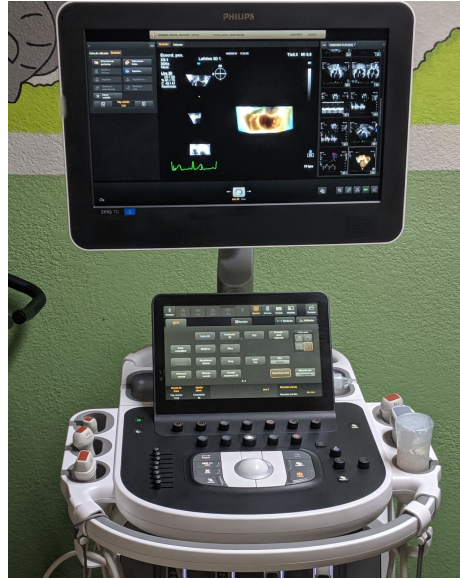


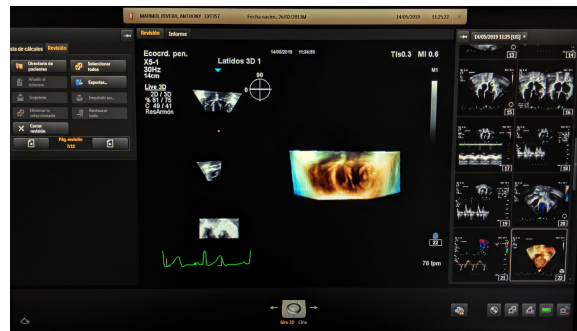
Figura 11: Sistema completo de EPIQ 7G

C. Philips EPIQ 7G

Es un sistema ultrasónico, diseñado y fabricado por Philips, especializado en la generación de imágenes para las áreas de radiología, cardiología, vascular, ginecología, ultrasonidos obstétricos y análisis. El objetivo por el cual se creó este sistema fue para brindarle al usuario una alternativa ergonómica, móvil y flexible para distintos pacientes en condiciones donde estos pueden ser operados [17].



(a) Controles y pantalla táctil



(b) Visualización en pantalla de imagen médica

Figura 12: EPIQ 7G

Entre las tantas funciones que tiene este sistema caben resaltar las siguientes [8]:

- xMATRIX lo cual brinda la oportunidad de producción de imágenes 2D y volúmenes 3D y 4D entre otros.
- Detección de ritmo cardíaco.
- iSCAN que permite la obtención de imágenes de alta calidad.

- Interfaz táctil para navegación del sistema.

D. Digital Imaging and Communications in Medicine

Digital Imaging and Communications in Medicine generalmente conocido como DICOM es un estándar internacional sobre la transferencia, almacenamiento, obtención, impresión, procesamiento y presentación de la información de imágenes médicas. Creado en 1993 DICOM revolucionó la forma de compartir la información en áreas como la radiología. Actualmente es implementado en radiología, cardiología, radioterapia como Rayos-X, Tomografías Computarizadas -CT-, Resonancias Magnéticas -MRI-, Ultrasonidos, etc [6].



Figura 13: Ejemplo de imagen DICOM de cráneo [15]

Cabe resaltar que este estándar se encuentra integrado en los dispositivos de producción de imágenes médicas convirtiéndolo en el archivo universal por excelencia en el área médica. Finalmente este es un estándar gratuito que sigue siendo sujeto a constante desarrollo y mantenimiento mientras la tecnología evoluciona [6].

E. Algoritmos de filtrado

Una imagen es la representación digital de un objeto que está siendo iluminado por una fuente de luz. Estas imágenes son representadas en la computadora por medio de matrices de $N \times M$ dimensiones donde cada elemento es representado como un pixel que brinda la intensidad de la imagen en esa ubicación [10].

Existen distintas formas con las cuales una imagen puede ser filtrada ya sea en el dominio espacial o en frecuencia. De tal forma que los filtros utilizados se dividen en:

- Filtros simples, estos se basan en la conceptualización de los resultados producidos por la utilización de filtros como: normalización, filtros de media, dilatación y pasa-banda.
- Filtros basados en el uso de la convolución, los cuales aprovechan el equivalente de la convolución en el dominio de la frecuencia -una multiplicación de dos funciones-.

- Filtros basados en histogramas

F. Archivos *STL*

Los archivos *STL -StereoLithography-* son el archivo de modelado y prototipado en 3D más utilizado de los últimos años. Se basan en la representación triangular de una superficie geométrica en 3 dimensiones, donde la superficie es muestreada utilizando series de triángulos pequeños llamados facetas. Cada faceta es descrita por su dirección perpendicular y la ubicación de los vértices del triángulo formando capas que luego se unen para formar el modelo 3D completo [20].

Se utiliza una sola malla de triángulos cerrada la cual define la forma del objeto. La resolución del modelo se basa en la cantidad de triángulos de los que está compuesto como puede verse en la siguiente figura, la cual muestran las facetas en el modelo de una esfera con baja resolución y como se soluciona este problema al aumentar la cantidad de facetas.

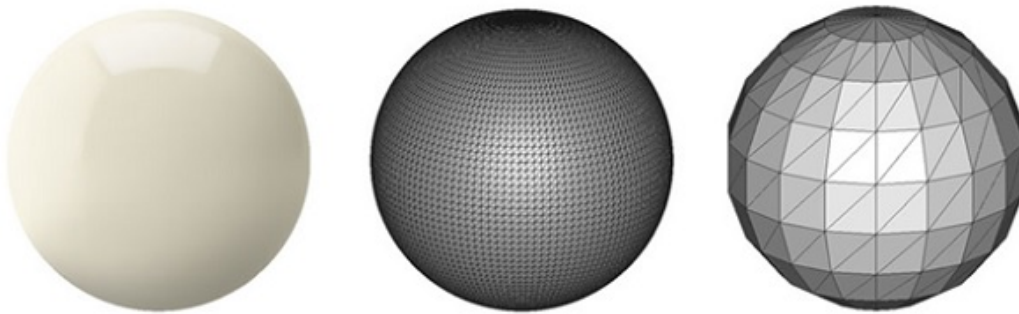


Figura 14: Comparativa de distintas resoluciones de archivos *STL* [13]

Generación de archivos DICOM desde Philips EPIQ 7G



Figura 15: EPIQ 7G [24]

Este capítulo se enfoca en mostrar el proceso utilizado para la extracción de un archivo DICOM en 3D/4D completo utilizando la máquina EPIQ 7G de Philips.

A. Obtención de archivos DICOM

Las imágenes obtenidas desde la EPIQ 7G son archivos DICOM codificados por Philips los cuales, por configuración de fábrica, no pueden ser extraídos por completo. Por lo tanto se debió activar la opción *Export 4D and Matrix 3D/4D Volume Data* como se muestra en la figura a continuación.

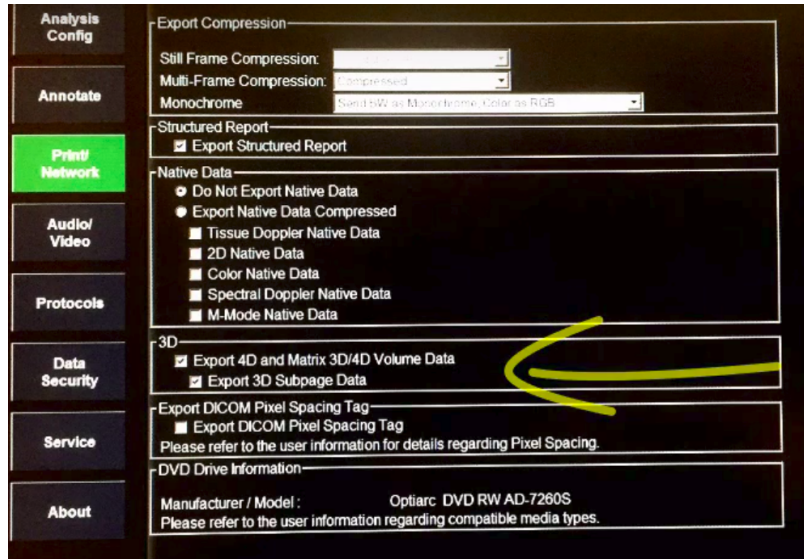


Figura 16: Exportación completa de datos ecocardiográficos [2]

De no ser así, los archivos obtenidos simplemente mostrarían imágenes sin profundidad. A continuación se muestra una figura ejemplificando el modelaje en 3D sin esta opción activada.

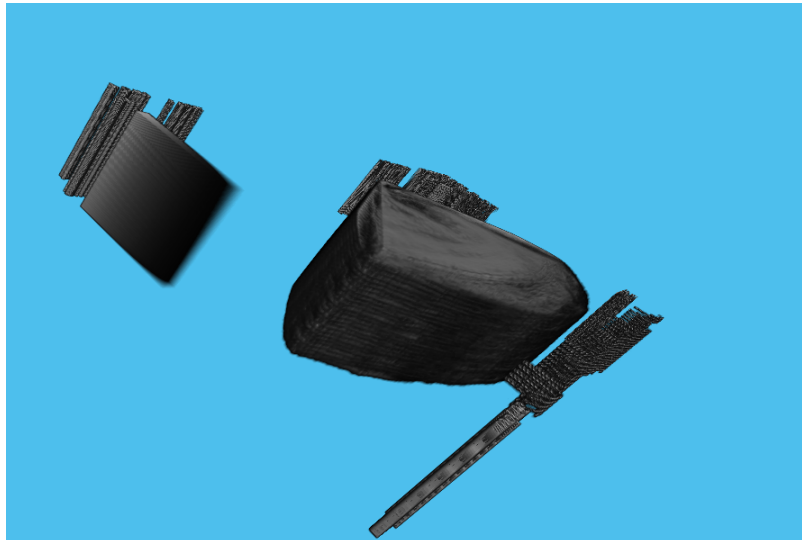


Figura 17: Modelo 3D sin extracción completa

B. Obtención de ecocardiografía de corazón completo

A continuación se procedió a insertar una memoria USB en la EPIQ 7G, esta fue la ubicación donde se almacenaron las imágenes de los pacientes, se le recomienda un almacenamiento de al menos 8GB. Cabe resaltar que al extraer los archivos DICOM del paciente tuvo de encontrar una imagen en 3D o 4D como la que se muestra a continuación. Este tipo de imágenes permitieron la extracción de un modelo en los pasos siguientes.

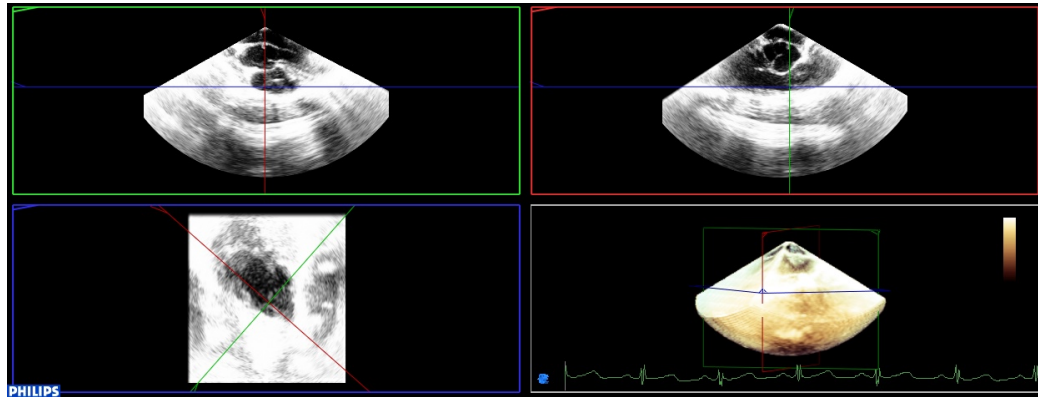


Figura 18: Ecocardiografía 3D sin alterar

DICOM Cartesiano utilizando QLAB

A. Manipulación de archivo DICOM

Los archivos DICOM obtenidos de la EPIQ 7G tienen el inconveniente de ser codificados y estar mapeados en un plano distinto al cartesiano. Por consiguiente, como siguiente punto se expondrá el procedimiento a seguir para la obtención de archivos DICOM Cartesianos, archivos utilizados para la creación de modelos en 3D.

De esta forma se empezó abriendo la aplicación de *QLAB* e importando los archivos DICOM extraídos seleccionando el botón de *Examinar*.

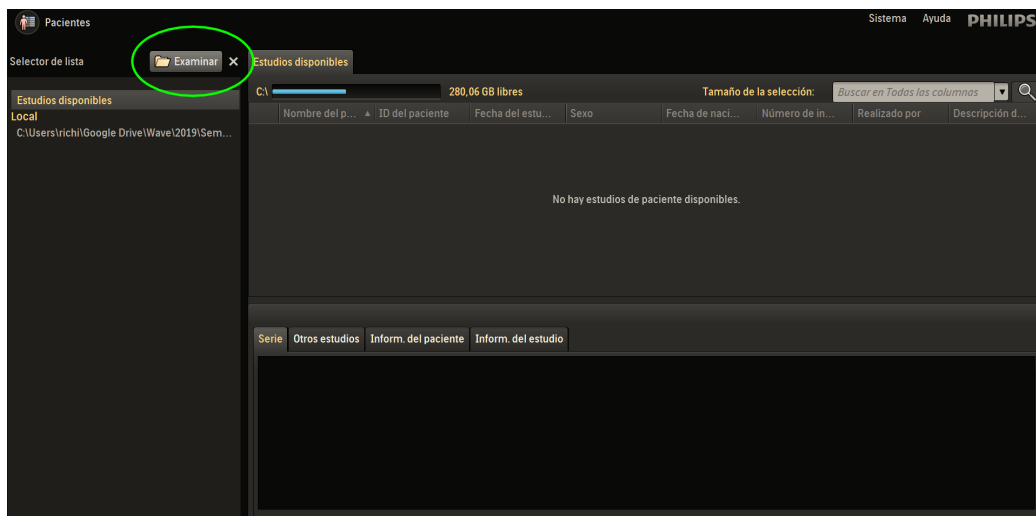


Figura 19: Pantalla principal QLAB

A continuación se visualizaron todas las imágenes médicas extraídas en el capítulo anterior. Se seleccionó la imagen en 3D que se deseaba extraer en cartesiano y se abrió la aplicación de *QLAB* llamada *3DQ*.

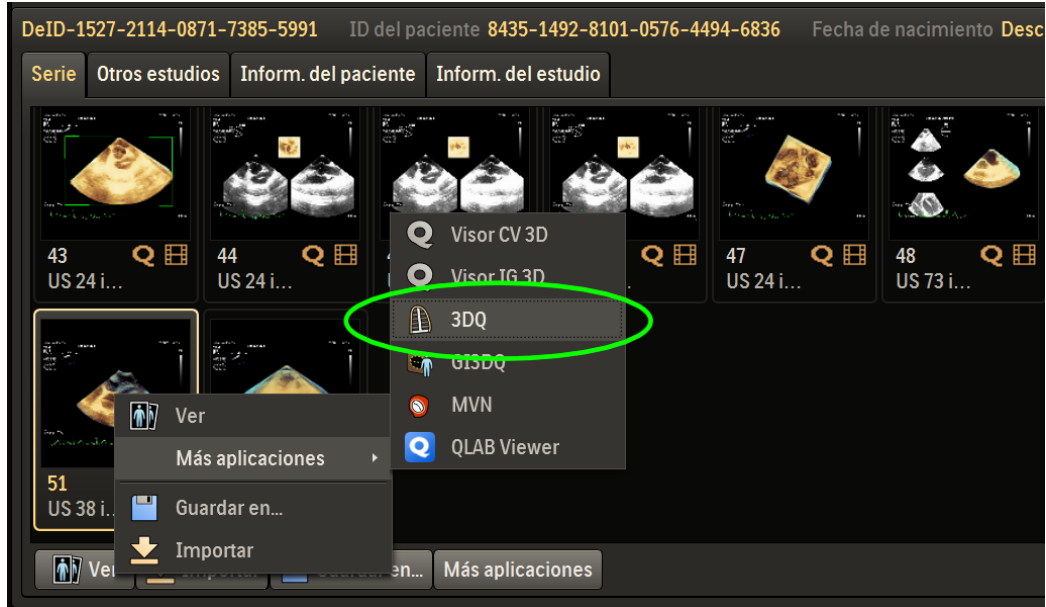


Figura 20: Selección de archivo DICOM y aplicación 3DQ

En este punto se pudieron visualizar y realizar mediciones del modelo como tal, al igual que manipularlo de tal forma que se eliminaran parte de los restos innecesarios del archivo DICOM.

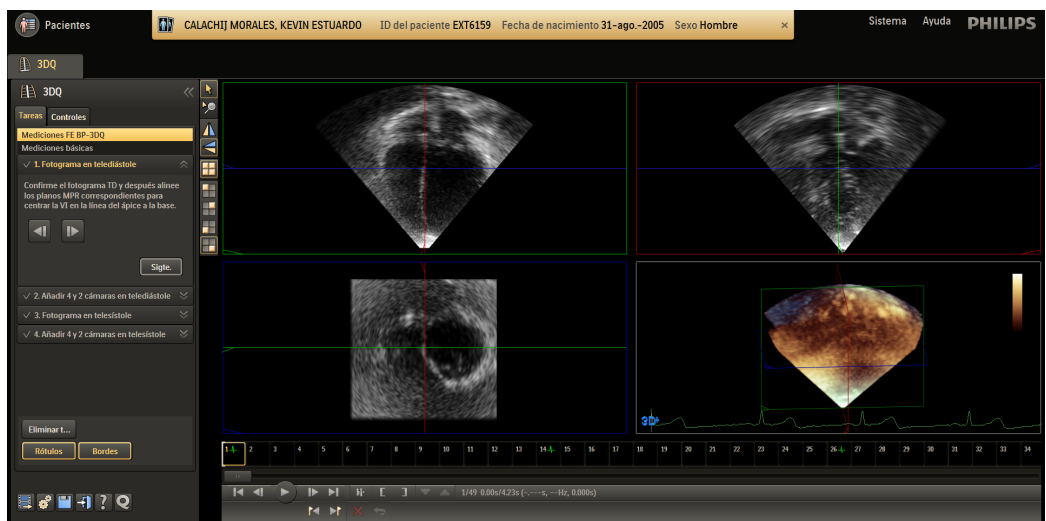


Figura 21: Archivo DICOM

B. Exportación en DICOM Cartesiano

Al haber terminado la manipulación de los modelos, se seleccionó el botón de exportar y luego el tipo de archivo *Formato Cartesiano de DICOM 3DDCM* como puede observarse en las figuras a continuación.

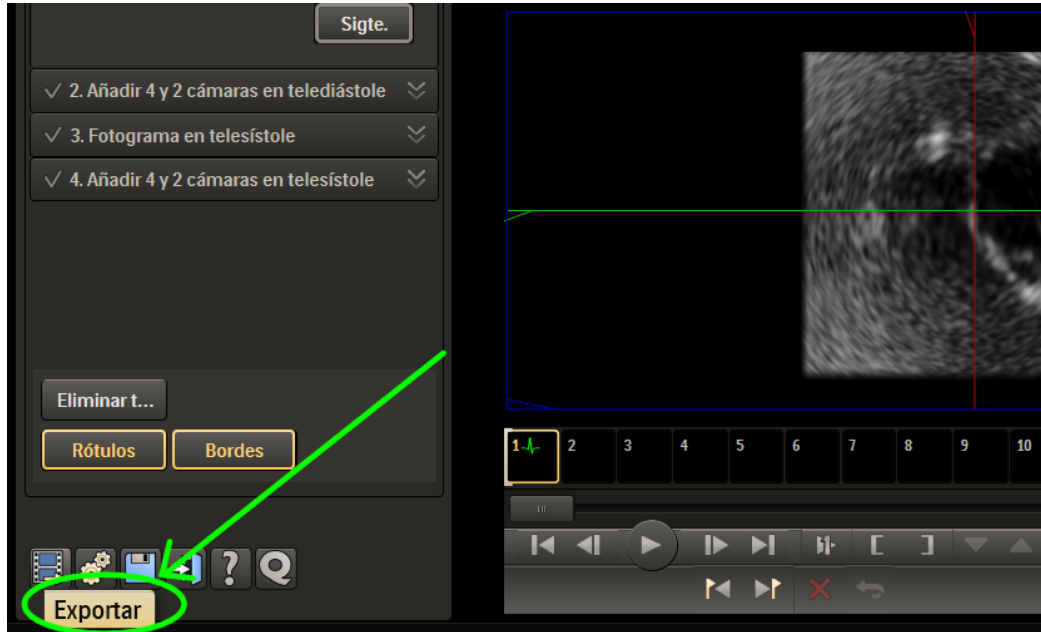


Figura 22: Seleccionar exportar imagen

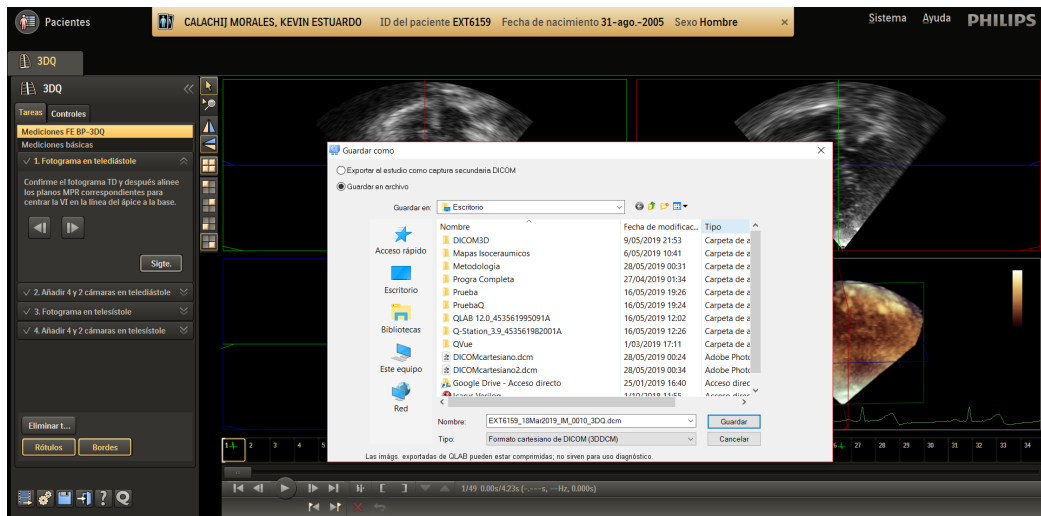


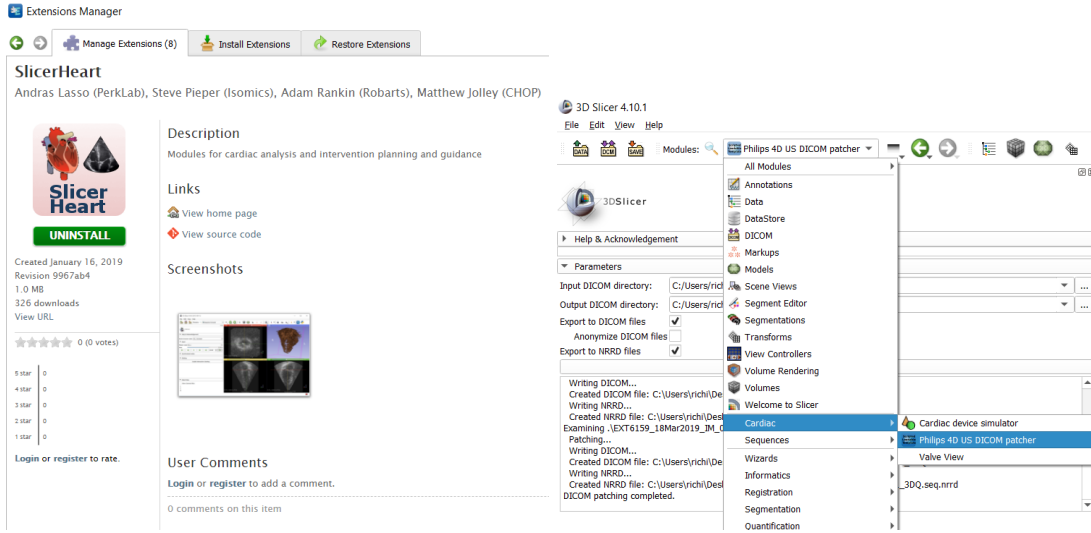
Figura 23: DICOM Cartesiano

El modelaje en 3D de los archivos Cartesianos DICOM fue realizado con la herramienta de código abierto *Slicer3D*. Este programa permite visualizar y modificar tanto imágenes médicas DICOM en 2D como en 3D. Se decidió utilizar este software como herramienta de edición y modelaje debido a su variedad de extensiones, en particular *Slicer Heart* la cual será descrita a continuación.

A. *Slicer Heart*

Slicer Heart es una extensión que contiene distintas herramientas que permiten la importación de varios tipos de imágenes médicas como: Ultrasonidos en 3D y 4D, Tomografías Computarizadas y Resonancias Magnéticas. Cabe resaltar que esta misma extensión tiene la particularidad de permitir la conversión de archivos DICOM Cartesianos obtenidos de QLAB en formatos DICOM comunes y en NRRD [19]. Esta puede encontrarse en el menú de extensiones de *Slicer3D* para las versiones anteriores a la 4.10.1.

En la siguiente figura se presenta tanto la extensión utilizada como la ubicación en el programa. En esta última pueden observarse las distintas opciones que ofrece *Slicer3D*, estas fueron utilizadas en como parte de la metodología en las próximas etapas.



(a) Extensión *Slicer Heart*

(b) Ubicación de extensión

Figura 24: *Slicer Heart*

1. Obtención de archivos NRRD

A continuación seleccionó la carpeta donde se encuentran los archivos DICOM cartesianos, al igual que la ubicación donde fueron almacenados los archivos NRRD que permitieron el modelaje de imágenes médicas. Se seleccionó *Patch* y al haber finalizado el proceso se obtuvieron los archivos en el formato deseado para su procesamiento.

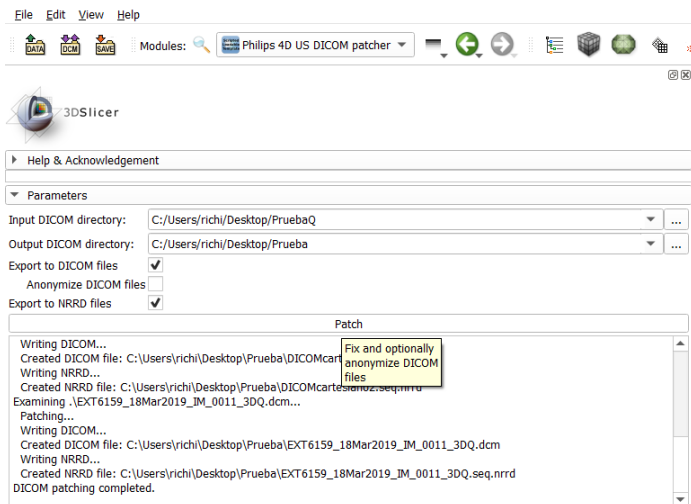


Figura 25: Extracción de archivos DICOM y NRRD

B. Imagen médica en archivo *STL*

Con el objetivo de obtener los archivos en formato *STL* de tal forma que estos pudieran ser impresos en 3D, se realizó un modelo basado en las imágenes médicas. Este proceso se realizó delimitando las partes del modelo cuadro por cuadro. *Slicer3D* permite este procesamiento con la metodología mostrada a continuación.

En primer lugar se importó el archivo NRRD deseado para ser modelado, utilizando la opción *Load Data* como se muestra en la figura a continuación. Este archivo fue importado como Secuencia Volumétrica de tal forma que pudiera ser detectado como un volumen, de lo contrario hubiera sido procesado como imagen de 2 dimensiones.

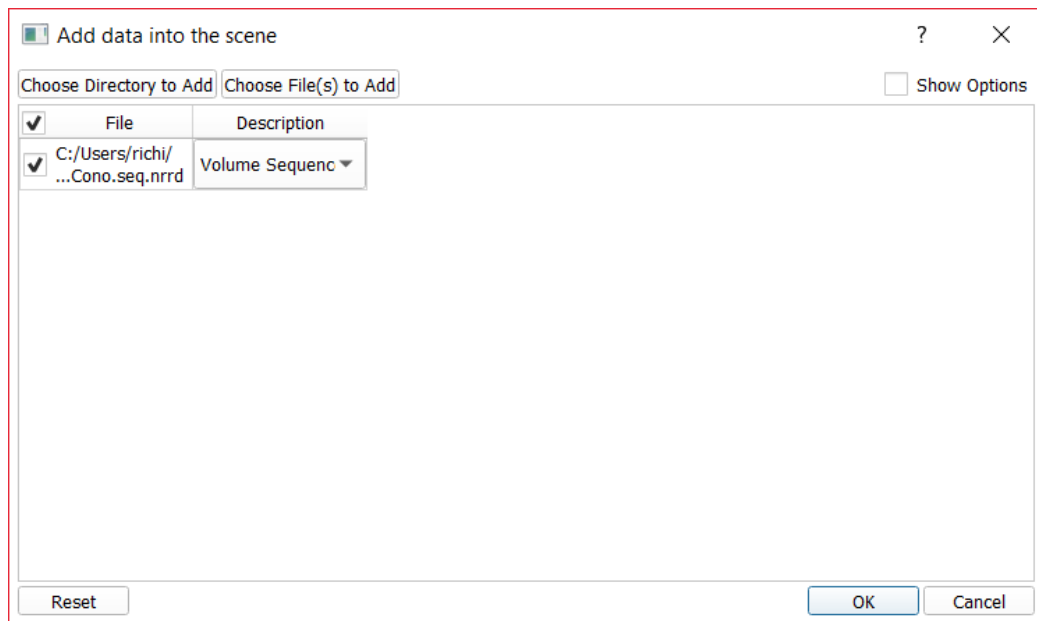


Figura 26: Importar NRRD

1. Aislar volumen relevante

Como siguiente paso se seleccionó *Volume Rendering* en el listado de opciones ofrecidas por *Slicer3D*. *Volume Rendering* permite visualizar el volumen de la imagen médica al igual que seleccionar el volumen relevante para modelado. Con el objetivo de recortar el volumen se activó la opción *Crop* al igual que *Display ROI* como muestra en la figura a continuación.

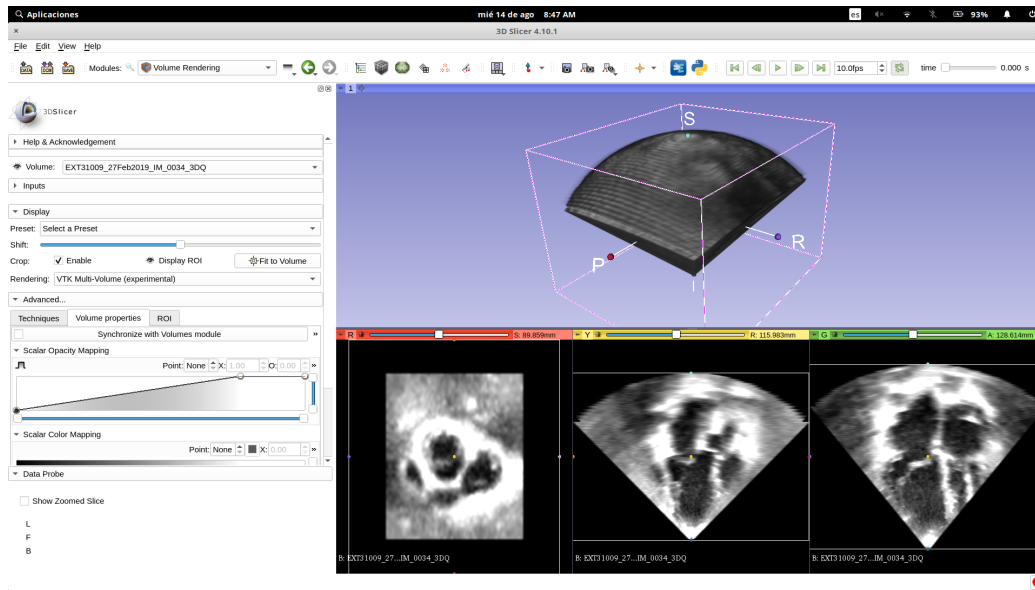


Figura 27: *Volume Rendering*

A continuación se seleccionó el volumen deseado dentro de un cubo de tal forma que se visualiza como la figura mostrada a continuación.

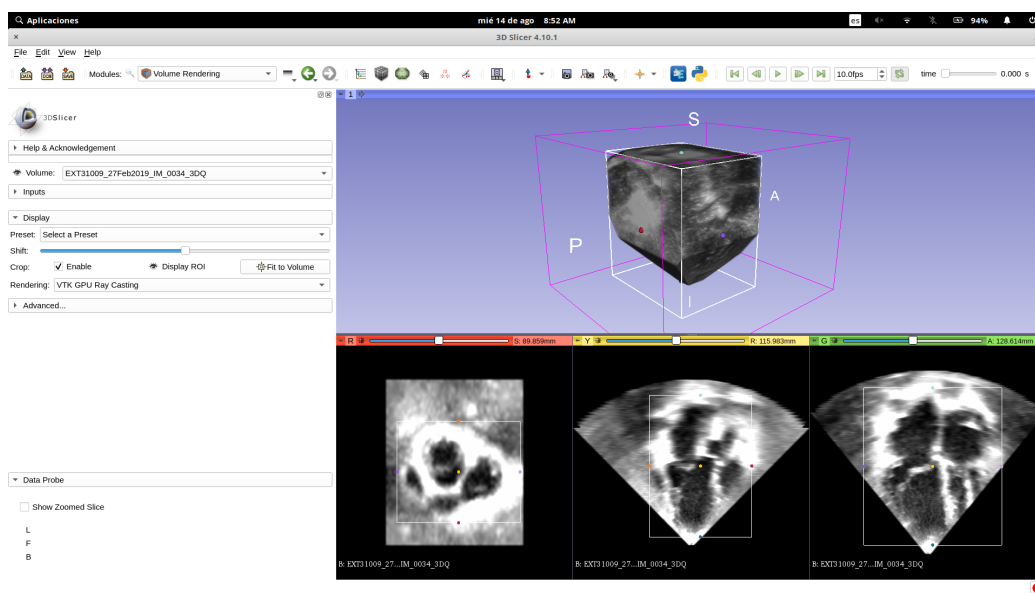


Figura 28: Selección de volumen

Como siguiente paso se seleccionó *Crop Volume* en el listado de opciones. Dentro de esta se aplicaron los cambios realizados al volumen como se muestra en la figura a continuación. Esto permitió que las imágenes médicas fueran delimitadas al área relevante seleccionada con anterioridad.

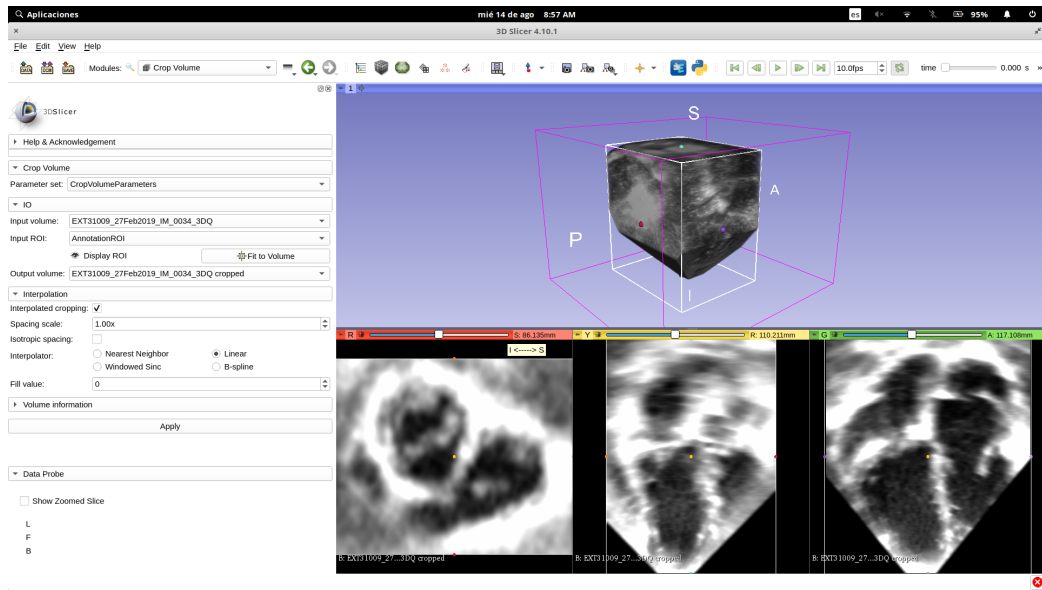


Figura 29: Volumen final

2. Crear modelo 3D

Puesto que el volumen deseado fue delimitado, a continuación se utilizó la herramienta *Editor* del listado de opciones. Esta herramienta permitió crear el modelo seleccionando las áreas deseadas en un cuadro y extrapolándolas al resto del volumen ya que se utilizó el efecto de *Threshold* como se muestra a continuación. *Threshold Effect* permitió seleccionar áreas específicas del volumen por medio de separación por tonalidades.

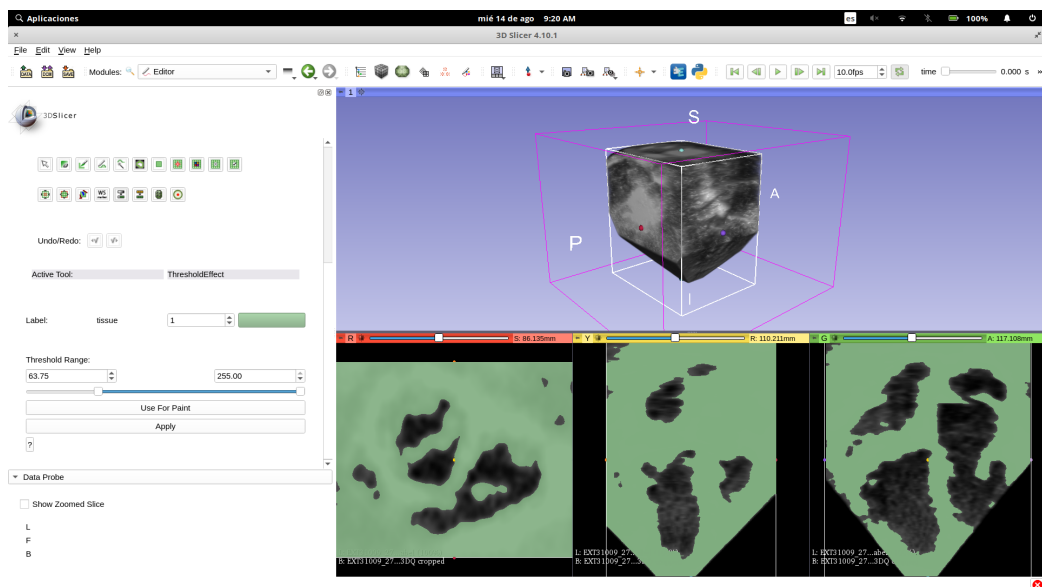


Figura 30: Selección de áreas en *Editor*

Seguidamente se aisló el área en la cual se visualizó la mayor cantidad de información ya que más tarde se modelaron en 3D estos datos. En la siguiente figura se muestra el área seleccionada para la imagen médica utilizada en las figuras anteriores.

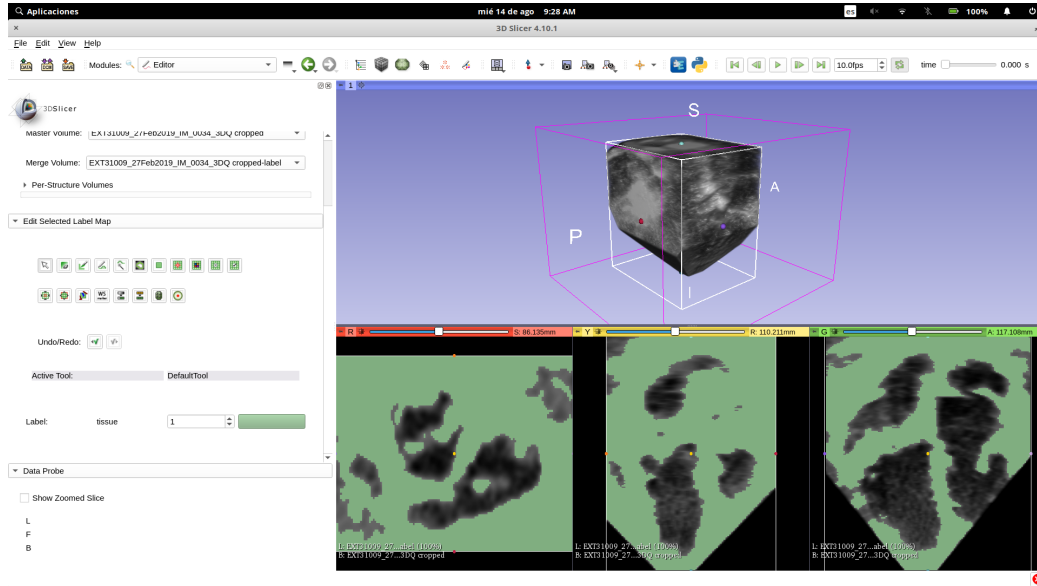
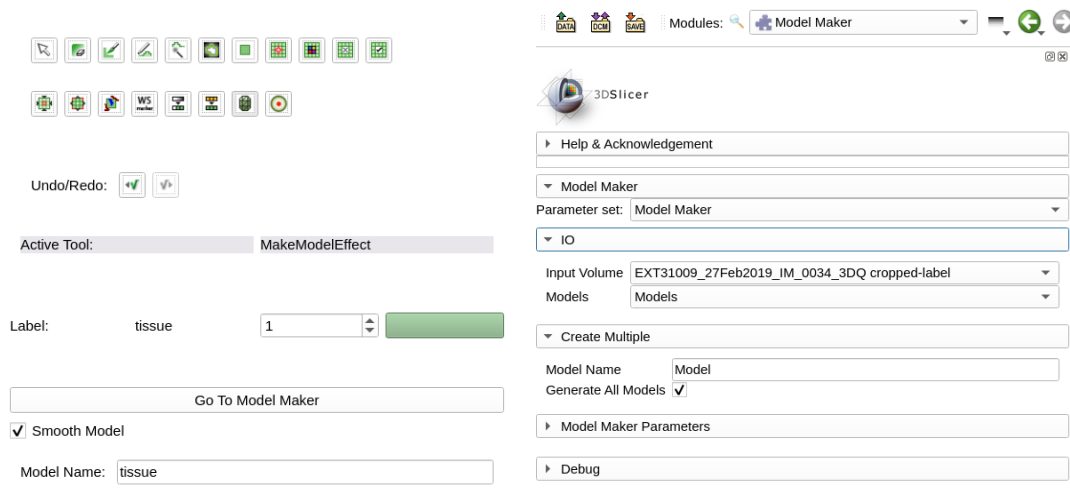


Figura 31: Creación de modelo

Después, igualmente en *Editor*, se seleccionó el efecto *MakeModel* ya que este permitió crear el modelo utilizando los *frames* creados anteriormente. Se seleccionó *Go to Model Maker* lo cual llevó a la herramienta *Model Maker*. Tal como se muestra a continuación se utilizó la imagen médica como volumen entrada y se deberá seleccionar la opción de crear *New ModelHierarchy*.



(a) *MakeModelEffect*

(b) *Model Maker*

Figura 32: Creación de modelo 3D

3. Exportar *STL*

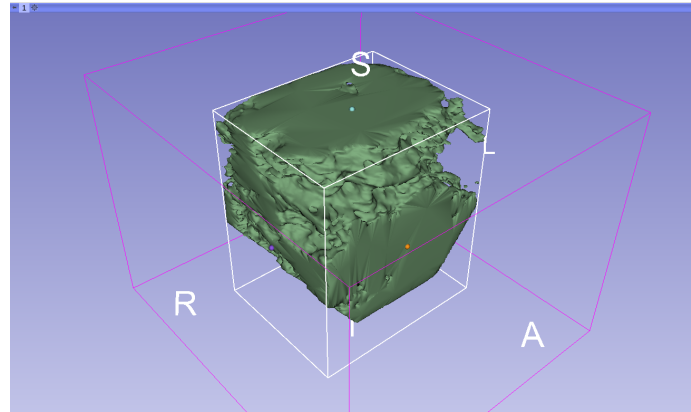


Figura 33: Modelo 3D

Al aplicar los cambios realizados se obtuvo un modelo como el que se muestra en la figura anterior. Finalmente se seleccionó guardar, mostrando una pantalla como en la siguiente figura.

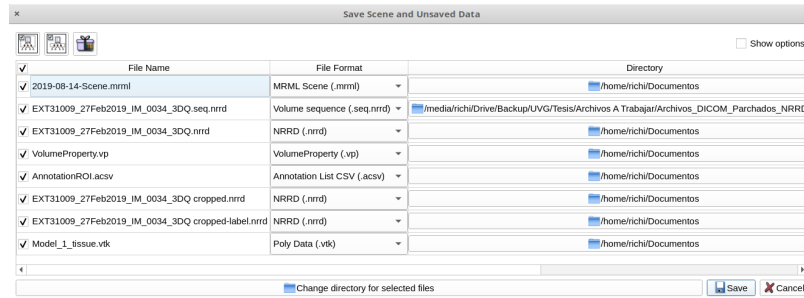


Figura 34: Exportar modelo

Se seleccionaron solamente los archivos que se deseaban exportar, en el caso del modelo se cambió el formato de *Poly Data* a *STL* como se muestra a continuación.

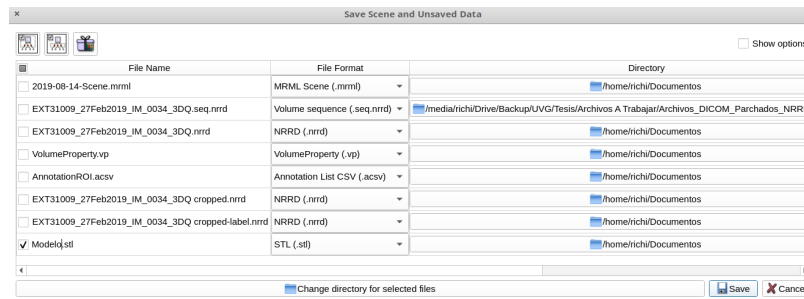


Figura 35: Exportar modelo en formato *STL*

Modelaje utilizando tomografías computarizadas -TC-

A diferencia de las ecocardiografías mostradas anteriormente, las TC son imágenes transversales del cuerpo utilizando una máquina de Rayos X y múltiples detectores. Estas permiten visualizar la complejidad estructural de un organismo diferenciando sus tejidos en base a sus densidades. Las imágenes capturadas con sistemas tomográficos por encima de 16 detectores permiten la exploración multiplanar (axial, coronal, sagital y oblicuo) del objeto analizado. En este capítulo se mostrarán los resultados de utilizar una tomografía como imagen médica para obtención de modelos en 3D.

Se expondrán las modificaciones realizadas a la metodología que permitieron obtener los modelos tridimensionales como son las Unidades Hounsfield -UH-. Las UH son unidades proporcionales al nivel de atenuación por píxel en una TC. Estas muestran la densidad del tejido en escala de grises donde lo blanco es lo más denso, los huesos y lo negro es lo menos denso, el aire. [18].

Finalmente, cabe resaltar la diferencia entre los cortes utilizados a continuación: 5 mm y 0.6 mm. Principalmente, la diferencia es la resolución ya que entre menor sea el tamaño de los cortes mejorará la resolución de la tomografía. Por su contra parte al incrementar la resolución incrementa igualmente la radiación impuesta al paciente. Por esta razón es que se dice que es imposible tener cortes menores a 0.6 mm ya que el incremento en resolución no valdría la pena en comparación a la radiación necesaria [11].

A. Tomografía de baja resolución con cortes de 1mm sin medio de contraste

En primer lugar realizaron las pruebas utilizando tomografías de baja resolución. A continuación, se prosiguió con los pasos mostrados en la sección 9.1 donde se insertan las



Figura 36: Ejemplo de tomografía computarizada de tórax [21]

imágenes en *Slicer3D*. El archivo a trabajar puede observarse en la Figura 37.

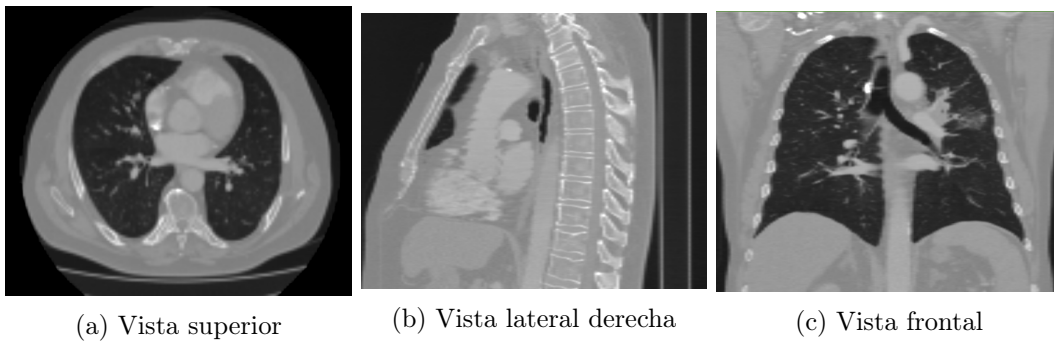


Figura 37: Tomografía de baja resolución con corte de 1mm sin medio de contraste

Cabe resaltar que a diferencia de la sección 9.2.2, en el caso de las tomografías estas sí tienen información de las densidades por píxel, por lo tanto el *Threshold Effect* muestra un histograma de densidades. Por esta razón se pudo eliminar gran parte de las densidades que no eran relevantes. Partiendo del conocimiento que el -1000 es aire, el 0 es agua y 1000 son los huesos, se seleccionaron los valores entre 0 y 50 ya que el músculo y tejidos relacionados poseen valores entre estos rangos.

A continuación, en la Figura 38, se muestra el modelo obtenido con estas imágenes. Cabe resaltar que estos modelos fueron filtrados para enfatizar

B. Tomografía de alta resolución y corte de 5mm sin medio de contraste

Debido a las deficiencias en detalles del modelo anterior se buscaron alternativas con mejor resolución. A continuación, en la Figura 39, se presentan las imágenes utilizadas. En

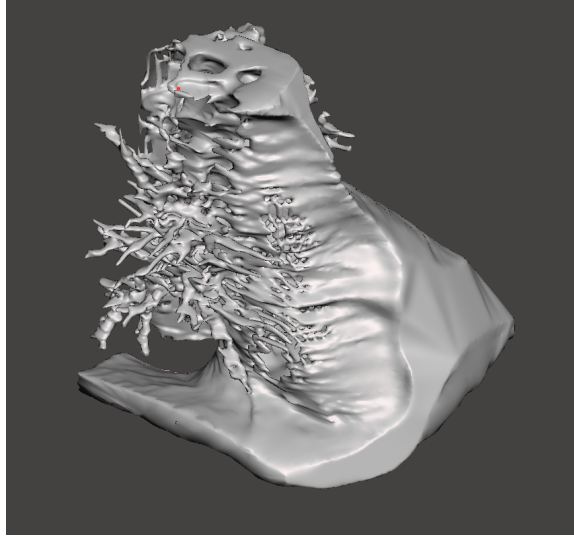
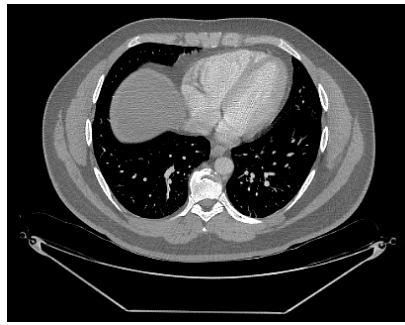


Figura 38: Modelo de tomografía de baja resolución

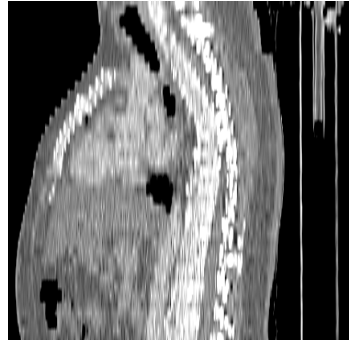
la Figura 40 se presenta el modelo obtenido del procesamiento de estas imágenes luego de ser filtrado y suavizado.

C. Tomografía de alta resolución y corte de 0.6mm con medio de contraste

Como pudo observarse en la sección anterior, el modelo obtenido tiene más detalles. El problema fue la falta de cavidades en el modelo final. Esto fue resuelto al obtener imágenes médicas mejor resolución donde al paciente se le inyectó un medio de contraste. Este medio de contraste es un líquido de mayor densidad el cual permite visualizar las cavidades al diferenciar la sangre del corazón. Esto último puede ser apreciado en las imágenes de la Figura 41, donde la cavidades pueden ser claramente visualizadas ya que se muestran en un tono más claro que el resto del corazón.



(a) Vista Superior



(b) Vista Lateral Derecha



(c) Vista Frontal

Figura 39: Tomografía de alta resolución con corte de 5mm sin medio de contraste

A continuación se presentan tanto el modelo de las cavidades como el modelo del corazón completo. Estos modelos fueron filtrados y suavizados permitiendo así resaltar los detalles.

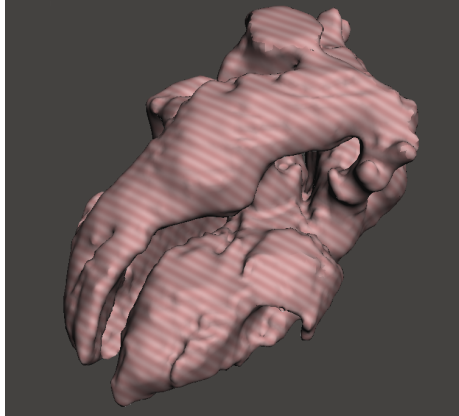
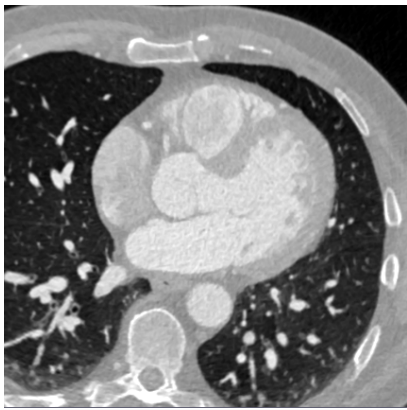
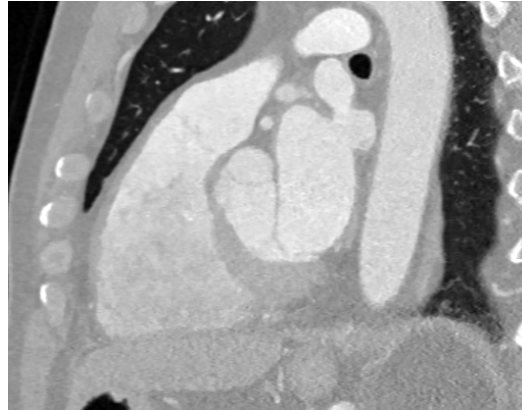


Figura 40: Modelo de tomografía de alta resolución corte 5mm

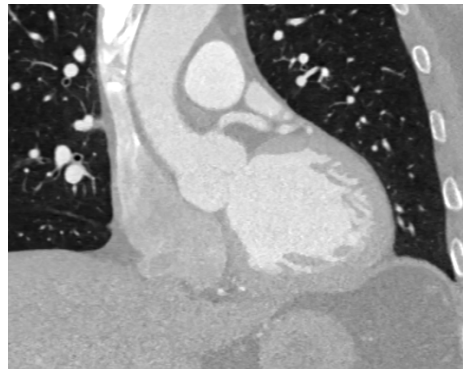
Finalmente, al observar los resultados satisfactorios vistos en las figuras anteriores se decidió hacer una última prueba utilizando imágenes donde el medio de contraste estuviera ubicado en ambas cavidades del corazón. Como puede observarse en la Figura 44 el medio de contraste se encuentra claramente en todo el corazón ya que todo está de un color más claro. Esto permitió formar el modelo en la Figura 45, donde se puede visualizar el corazón completo incluyendo la aorta al igual que el interior vacío por las cavidades.



(a) Vista superior

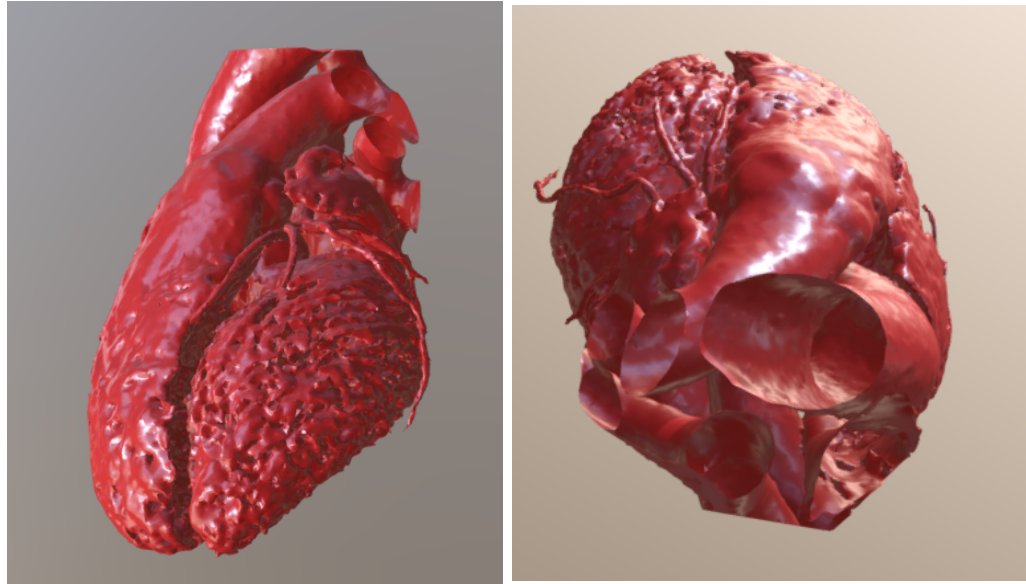


(b) Vista lateral derecha



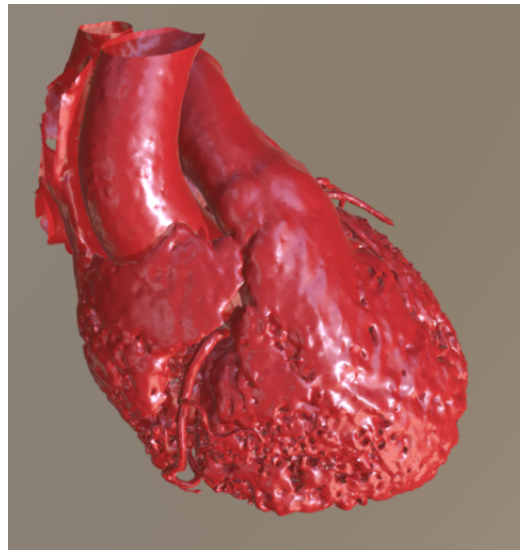
(c) Vista frontal

Figura 41: Tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ventrículo derecho



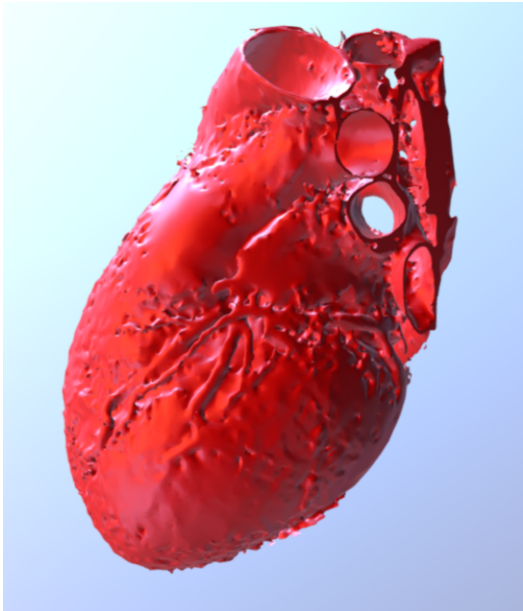
(a) Vista frontal

(b) Vista superior

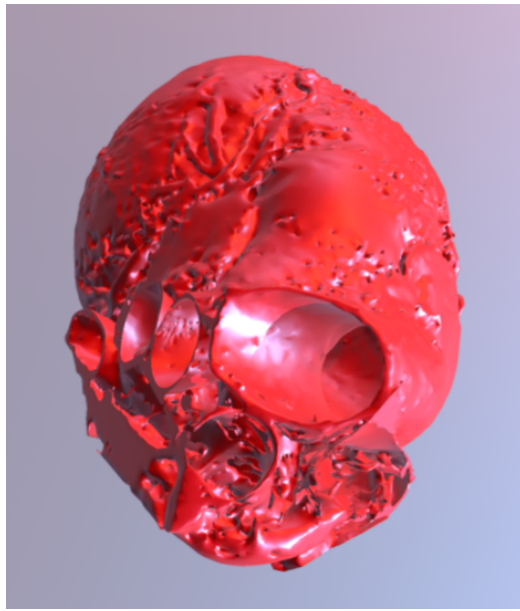


(c) Vista lateral derecha

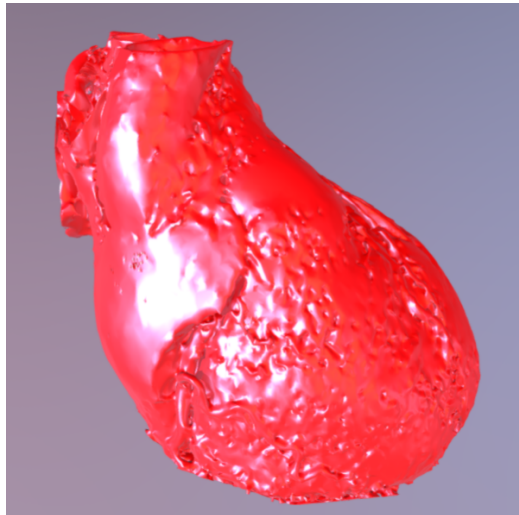
Figura 42: Modelo de cavidades de corazón con tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ventrículo derecho



(a) Vista frontal



(b) Vista superior

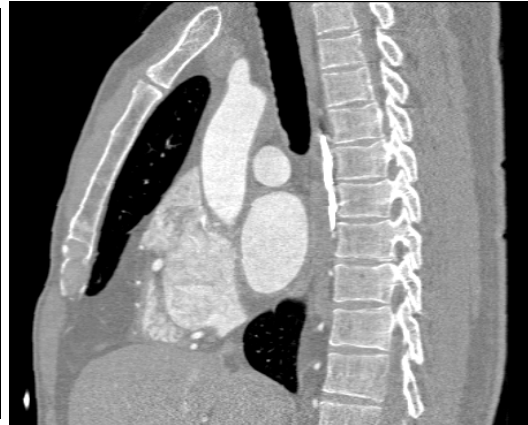


(c) Vista lateral derecha

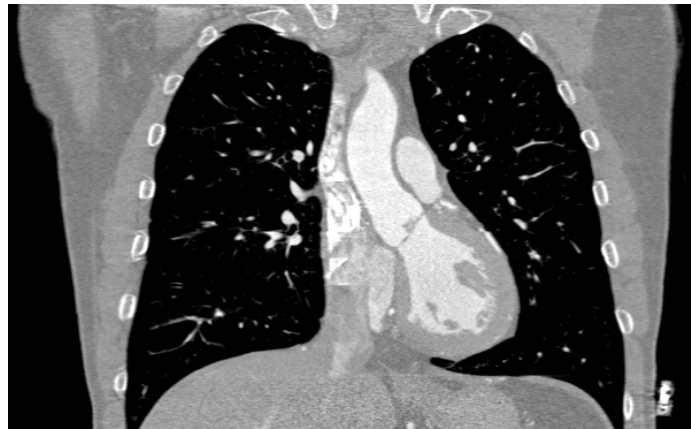
Figura 43: Modelo de corazón completo con tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ventrículo derecho



(a) Vista superior

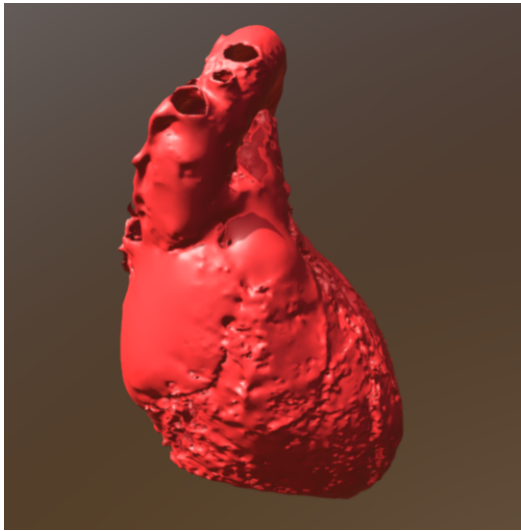


(b) Vista lateral derecha

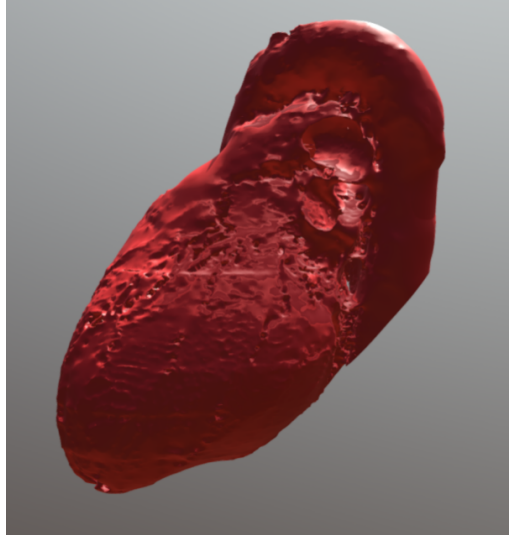


(c) Vista frontal

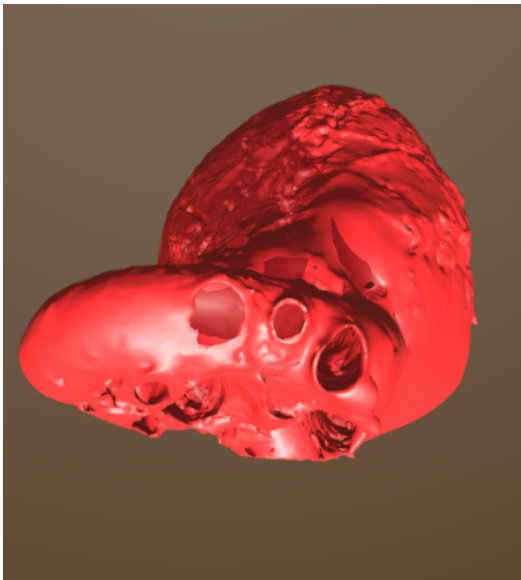
Figura 44: Tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ambas cavidades



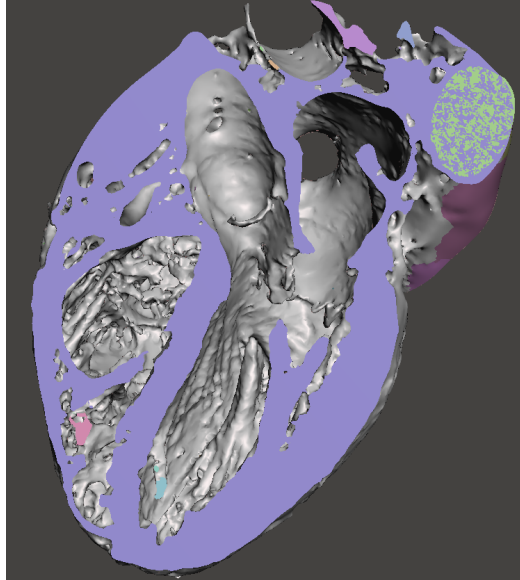
(a) Vista superior



(b) Vista lateral derecha



(c) Vista frontal



(d) Vista interior

Figura 45: Modelo de corazón completo con tomografía de alta resolución con corte de 0.6mm con medio de contraste en ambas cavidades

- Se comprobó que con la metodología de modelado 3D utilizada pueden producirse modelos *STL*. Sin embargo, cabe resaltar que las tomografías permiten obtener modelos de corazón de mejor calidad al tener información sobre la densidad del tejido por píxel, esto permite filtrar mejor las imágenes, obteniendo modelos asemejados a la vida real.
- La naturaleza de la ecocardiografía permite obtener imágenes médicas en movimiento las cuales brindan información sobre funcionamiento del corazón del paciente. A pesar del valor que esto representa para el médico y que la conversión a un modelo 3D sí es posible, las imágenes ultrasónicas no son adecuadas para la obtención de un modelos de corazón debido a la cantidad de ruido que estas presentan.
- Después presentar los resultados obtenidos a los médicos del hospital UNICAR, se llegó a la conclusión que los modelos obtenidos pueden de utilidad para procesos quirúrgicos y también para clases magistrales médicas siendo utilizados como modelos realistas. El poder visualizar el corazón de un paciente real con alguna cardiopatía desde una computadora o un teléfono celular les dará, a los alumnos, una alternativa interactiva y mejorará el entendimiento del problema que puede presentar un paciente.

- Se recomienda obtener tomografías de alta resolución con corte de 0.6mm y la mayor cantidad de medio de contraste presente en las imágenes ya que esto permitirá obtener las cavidades de los corazones con mayor detalle y la menor cantidad de ruido posible.
- En el caso de las ecocardiografías se recomienda buscar alternativas de modelado utilizando como base la impedancia acústica por tejido, información que puede ser obtenida en el archivo DICOM extraído.
- Adicionalmente se recomienda buscar alternativas para la obtención de ecocardiografías si se busca realizar modelaje con este tipo de imágenes ya que al utilizar máquinas de Philips como la EPIQ 7G los archivos se encuentran encriptados por lo que se requiere de la utilización de programas adicionales como *QLAB* para la obtención de imágenes que pueden ser trabajadas por *Slicer3D* y programas por el estilo.
- Por otro lado cabe resaltar que, por el momento, no es viable económicamente la utilización de esta metodología para la creación de modelos asemejados a los corazones físicos en todos los casos médicos debido a los costos elevados que representa la tomografía computarizada.
- Una alternativa económica puede ser un sistema de apoyo mutuo entre las universidades y hospitales donde los análisis realizados pueden ser parcialmente subsidiados por la universidad. Permitiendo así que las universidades tengan casos de estudios reales que puedan utilizar sus alumnos visualizando digital y físicamente los corazones.
- Cabe resaltar que la resonancia magnética puede permitir el desarrollar modelos aún más detallados debido a la cantidad de información que brinda. Un trabajo a futuro puede ser el adaptar la metodología mostrada previamente de tal forma que se pueda utilizar este tipo de imagen médica.
- Finalmente se recomienda utilizar una computadora de alto desempeño en el área de modelado gráfico ya que el procesamiento de los modelos digitales obtenidos representa una gran carga para las computadoras convencionales al ser archivos que rondan entre los 500MB y 1GB.

-
- [1] Administrator y D. A. Valle Muñoz, *Ecocardiograma*, es-es. dirección: <https://fundaciondelcorazon.com/informacion-para-pacientes/metodos-diagnosticos/ecocardiograma.html> (visitado 13-02-2019).
 - [2] Ahmed Hosny, *Three-dimensional printing of echocardiography data sets*. dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=LQLC31QJaWI>.
 - [3] F. Ballocca, L. M. Meier, K. Ladha, J. Q. Hiansen, E. M. Horlick y M. Meineri, “Validation of Quantitative 3-Dimensional Transesophageal Echocardiography Mitral Valve Analysis Using Stereoscopic Display”, *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, vol. 33, n.º 3, págs. 732-741, ago. de 2019. DOI: 10.1053/j.jvca.2018.08.013.
 - [4] O. College, *Anatomy Physiology*, 1st. OpenStax College, 2013, ISBN: 1938168135, 9781938168130.
 - [5] M. Daffertshofer y M. Hennerici, “Sonothrombolysis: Experimental Evidence”, *Handbook on Neurovascular Ultrasound Frontiers of Neurology and Neuroscience*, págs. 140-149, 2006. DOI: 10.1159/000092396.
 - [6] *DICOM Standard*. dirección: <https://www.dicomstandard.org/>.
 - [7] P. A. I. (eds.), *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices*, 3.ª ed. Springer International Publishing, 2015, ISBN: 978-3-319-19463-9, 978-3-319-19464-6.
 - [8] *EPIQ 7 Cardiology Ultrasound Machine | Philips Ultrasound*, en-us. dirección: <https://www.usa.philips.com/healthcare/product/HC795200C/epiq-7-ultrasound-system-for-cardiology>.
 - [9] S. K. B. B. B. D. P. F. F. FACC, *Echo Made Easy*, 2nd., 2009, ISBN: 0443103631, 9780443103636. dirección: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=31763BC012A7B1889EC0BCCCB3C1B507>.
 - [10] A. González, F. Martínez, A. Pernia, F. Alba, M. Castejón, J. Ordieres y E. Vergara, “Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial”, *UNIVERSIDAD DE LA RIOJA, SERVICIO DE PUBLICACIONES*, 2006.

- [11] T. C. Hain, *Superior Canal Dehiscence – Radiology*, oct. de 2018. dirección: <https://www.dizziness-and-balance.com/disorders/unilat/scd-radiology.htm>.
- [12] L. Hardesty, *Personalized heart models for surgical planning*, en, 2015. dirección: <https://news.mit.edu/2015/3-d-printed-heart-models-surgery-0917>.
- [13] *How to Choose the Best File Resolution for 3D Printing*, en-US, mayo de 2018. dirección: <https://i.materialise.com/blog/en/how-to-choose-the-perfect-file-resolution-when-turning-your-3d-model-into-a-3d-print/>.
- [14] C. M. O. MD, *Textbook of Clinical Echocardiography*, 6e, 6.ª ed. Elsevier, 2018, ISBN: 0323480489,9780323480482.
- [15] *Medikka Dicom Viewer*, en. dirección: <http://fernandojsg.com/project/medikka-dicom-viewer/>.
- [16] G. R. Miguel Ángel, “Principios básicos de ecografía”, 2016. dirección: https://continuum.aeped.es/files/guias/Material_descarga_unidad_1_ecocardioscopia.pdf.
- [17] Philips, *EPIQ 7 Ultrasound System User Manual*, eng-ENG, ago. de 2013. dirección: https://umanitoba.ca/faculties/health_sciences/medicine/units/anesthesia/media/Epiq_7user_manual__ENG.pdf (visitado 26-05-2019).
- [18] T. Razi, M. Niknami y F. A. Ghazani, “Relationship between Hounsfield unit in CT scan and gray scale in CBCT”, *Journal of dental research, dental clinics, dental prospects*, vol. 8, n.º 2, pág. 107, 2014.
- [19] A. B. Scanlan, A. V. Nguyen, A. Ilina, A. Lasso, L. Cripe, A. Jegatheeswaran, E. Silvestro, F. X. McGowan, C. E. Mascio, S. Fuller, T. L. Spray, M. S. Cohen, G. Fichtinger y M. A. Jolley, “Comparison of 3D Echocardiogram-Derived 3D Printed Valve Models to Molded Models for Simulated Repair of Pediatric Atrioventricular Valves”, *Pediatric Cardiology*, vol. 39, n.º 3, pág. 538, 1 de mar. de 2018, ISSN: 1432-1971. DOI: 10.1007/s00246-017-1785-4. dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s00246-017-1785-4>.
- [20] M. Szilvsi-Nagy y G. Mátyási, “Analysis of STL files”, *Mathematical and Computer Modelling*, Hungarian Applied Mathematics, vol. 38, n.º 7, págs. 945-960, oct. de 2003, ISSN: 0895-7177. DOI: 10.1016/S0895-7177(03)90079-3. dirección: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717703900793>.
- [21] *Tomografía Computada de Tórax · SOCHRADI*. dirección: <https://www.sochradi.cl/informacion-a-pacientes/torax-y-cardiovascular/tomografia-computada-torax/>.
- [22] G. J. Tortora y B. Derrickson, *Principios de anatomía y fisiología*. Médica Panamericana, 2015.
- [23] J. Vaskovic, *Heart*, mar. de 2020. dirección: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/heart>.
- [24] *Ver detalles de Philips EPIQ 7*, es-mx. dirección: <https://www.philips.com.mx/healthcare/product/HC795200/epiq-7-ultrasound-system>.
- [25] *Welcome to EchoPixel True 3D*. dirección: <https://www.echopixeltech.com/>.