

Jordi Broncano Cabrero¹,
Antonio Luna Alcalá², Javier
Sanchez Gonzalez³, Lidia Alcalá
Mata², Paula Montesino Suarez
De La Vega³

1.Hospital San Juan de Dios. Hospital Cruz
Roja. RESSALTA. Grupo Health Time,
Córdoba, España

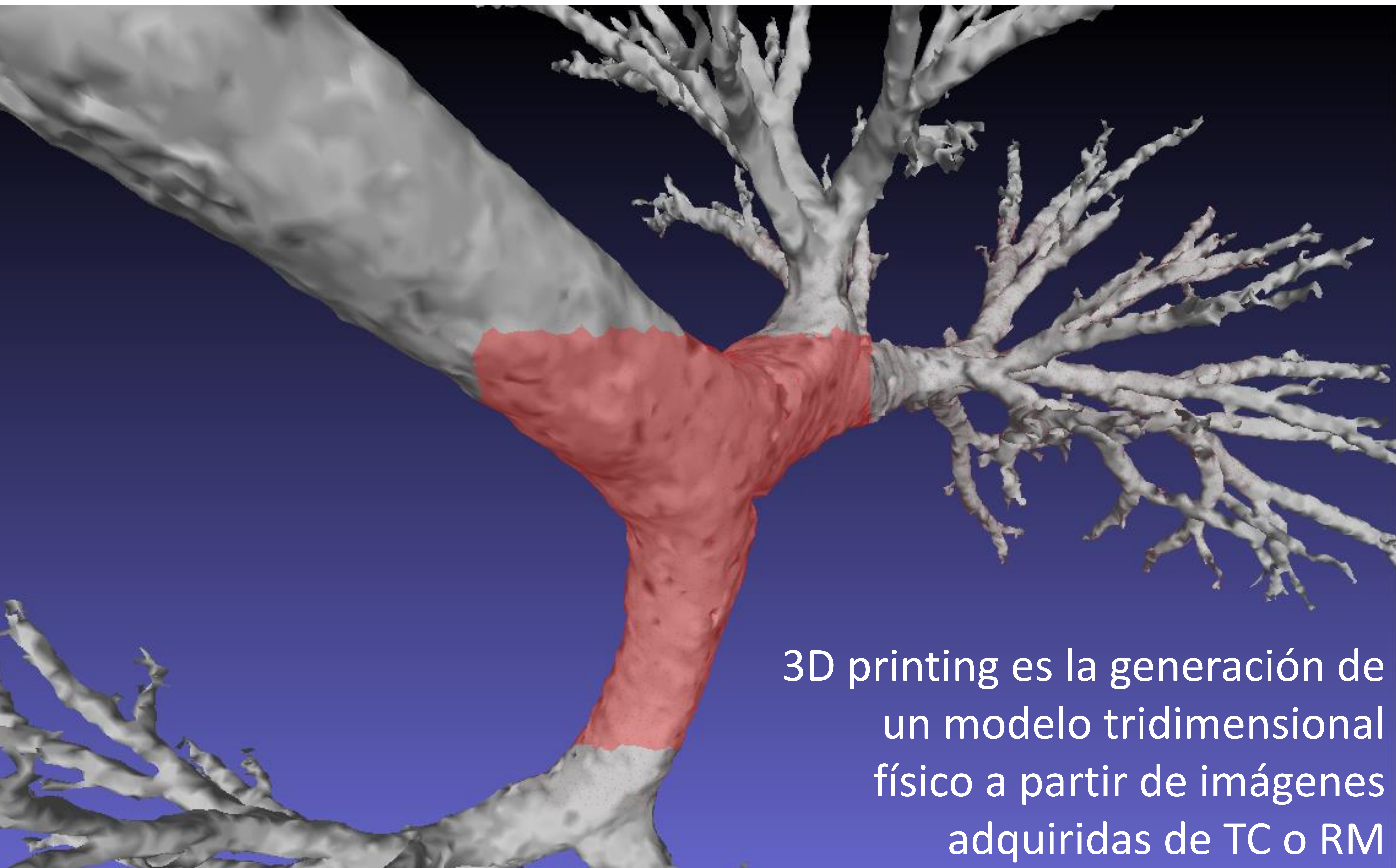
2.SERCOSA. Grupo Health Time, Jaen,
España

3.Philips Healthcare, Madrid, España

**Impresión 3D pre-
quirúrgica en tumores
torácicos con modelos
híbridos CT y RM:
Cómo hacerlo paso a
paso.**

1 Introducción al 3D printing

Concepto y tipos de archivo

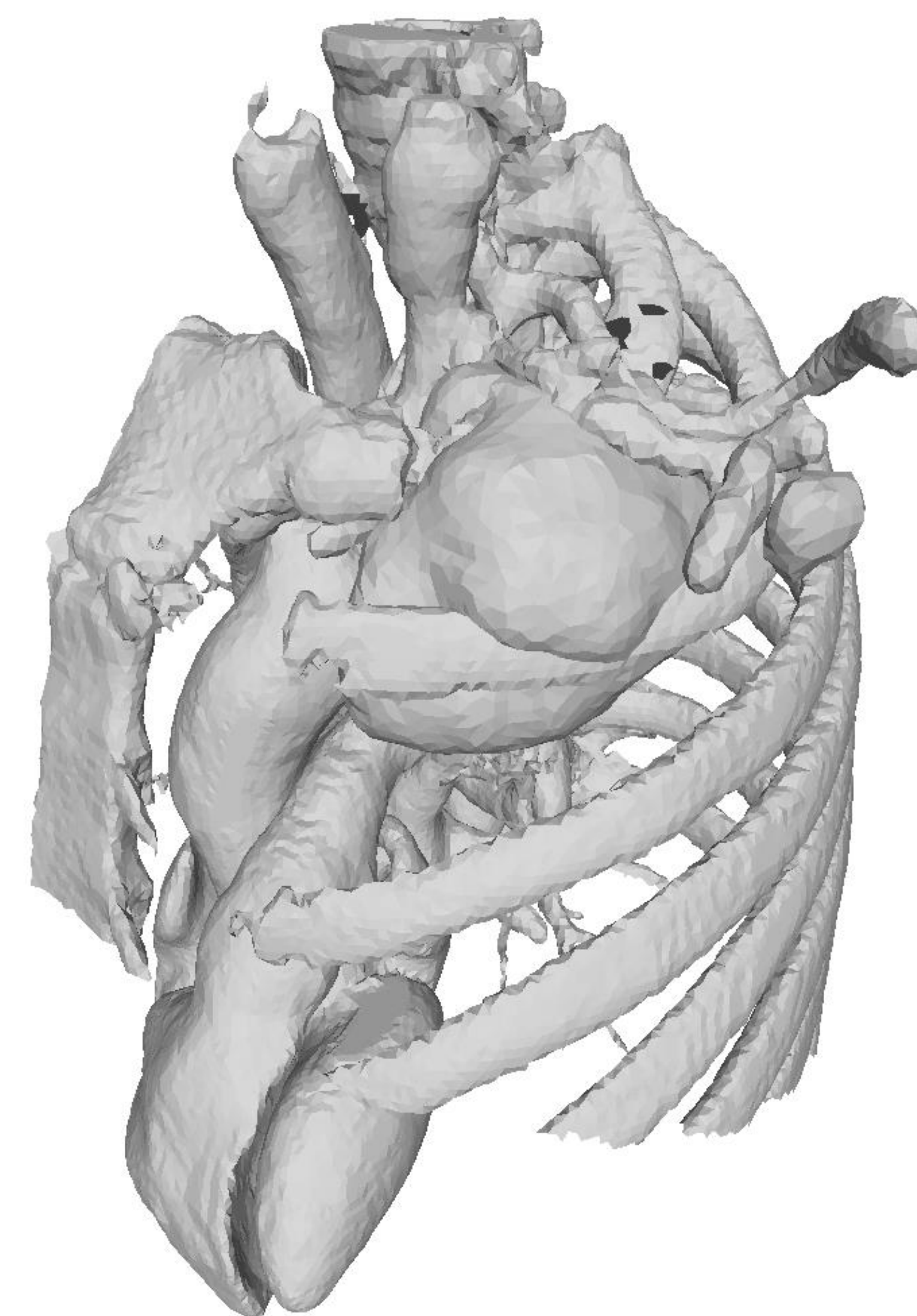
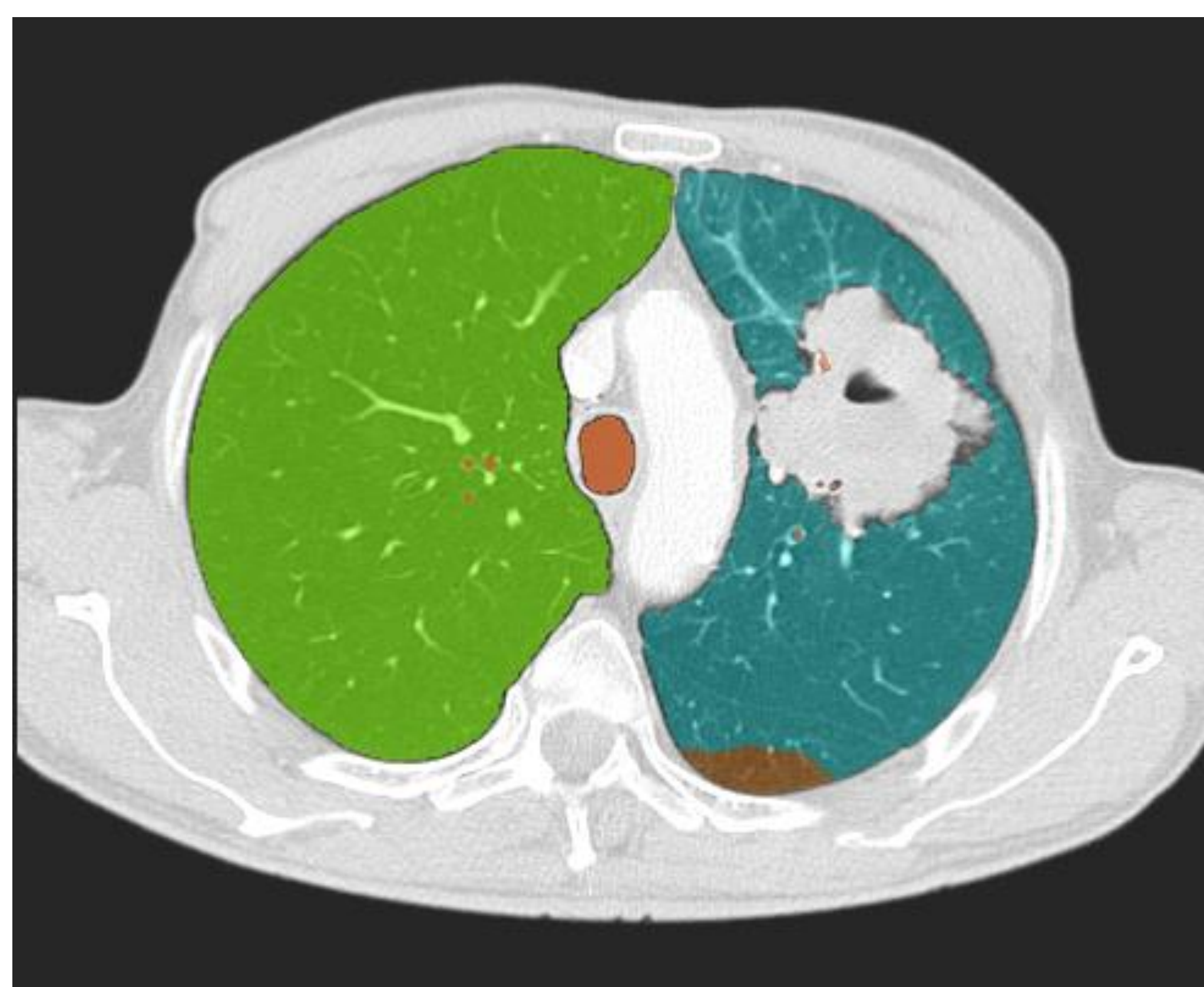
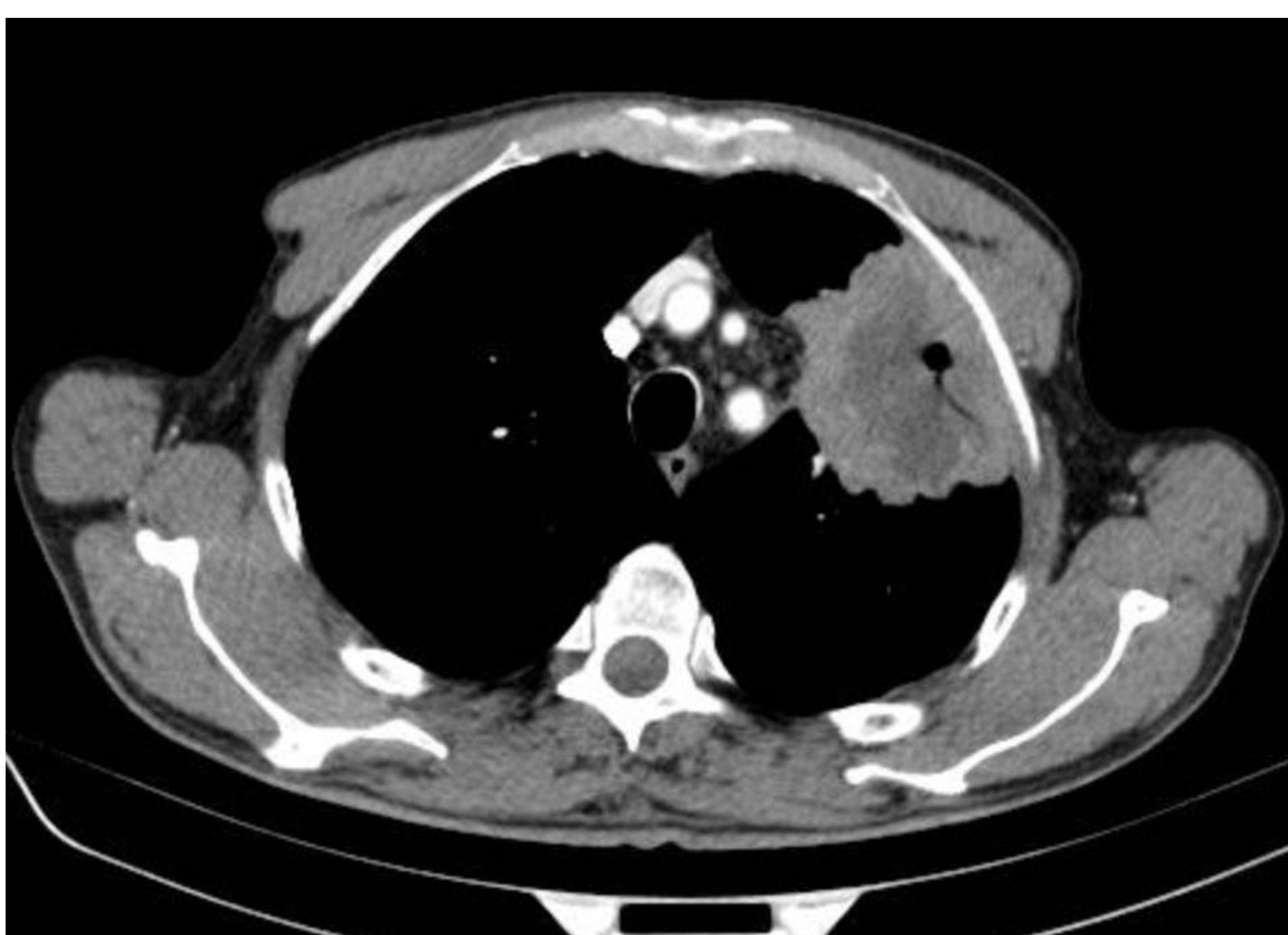


3D printing es la generación de un modelo tridimensional físico a partir de imágenes adquiridas de TC o RM

Archivo	Definición	Formato	Uso
*.stl	Standard Triangle or Tessellation Language	<ul style="list-style-type: none"> Superficie triangulada no estructurada con un sistema de coordenadas cartesianas 3D No contiene escala Unidades arbitrarias 	<ul style="list-style-type: none"> Prototipado rápido 3D printing Computer aided manufacturing
*.ply	Polygon file format Stanford file format	<ul style="list-style-type: none"> Descripción del objeto en una lista de polígonos planos nominales Codifica color, transparencia, textura, surface normals y data confidence values Mayor flexibilidad que *.stl 	<ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento de datos 3D. 3D printing
*.obj	Geometry definition file format	<ul style="list-style-type: none"> Información geometría 3D (vértices, triángulos, polígonos y texturas). Codifica diferentes materiales, color, texturas y transparencias. No contiene unidades. Contiene información escala. 	<ul style="list-style-type: none"> Advanced visualizer animation package Diseño gráfico 3D Open source 3D printing
*.amf	Additive manufacturing file format	<ul style="list-style-type: none"> Archivo basado en formato XML para procesos de additive manufacturing como la impresión 3D. Soporte nativo para materiales, color, lattices y constellations. Posible impresión diferentes materiales en un mismo objeto 3D 	<ul style="list-style-type: none"> Additive manufacturing process 3D printing Open source

1 Introducción al 3D printing

Flujo de trabajo y materiales



1. Adquisición

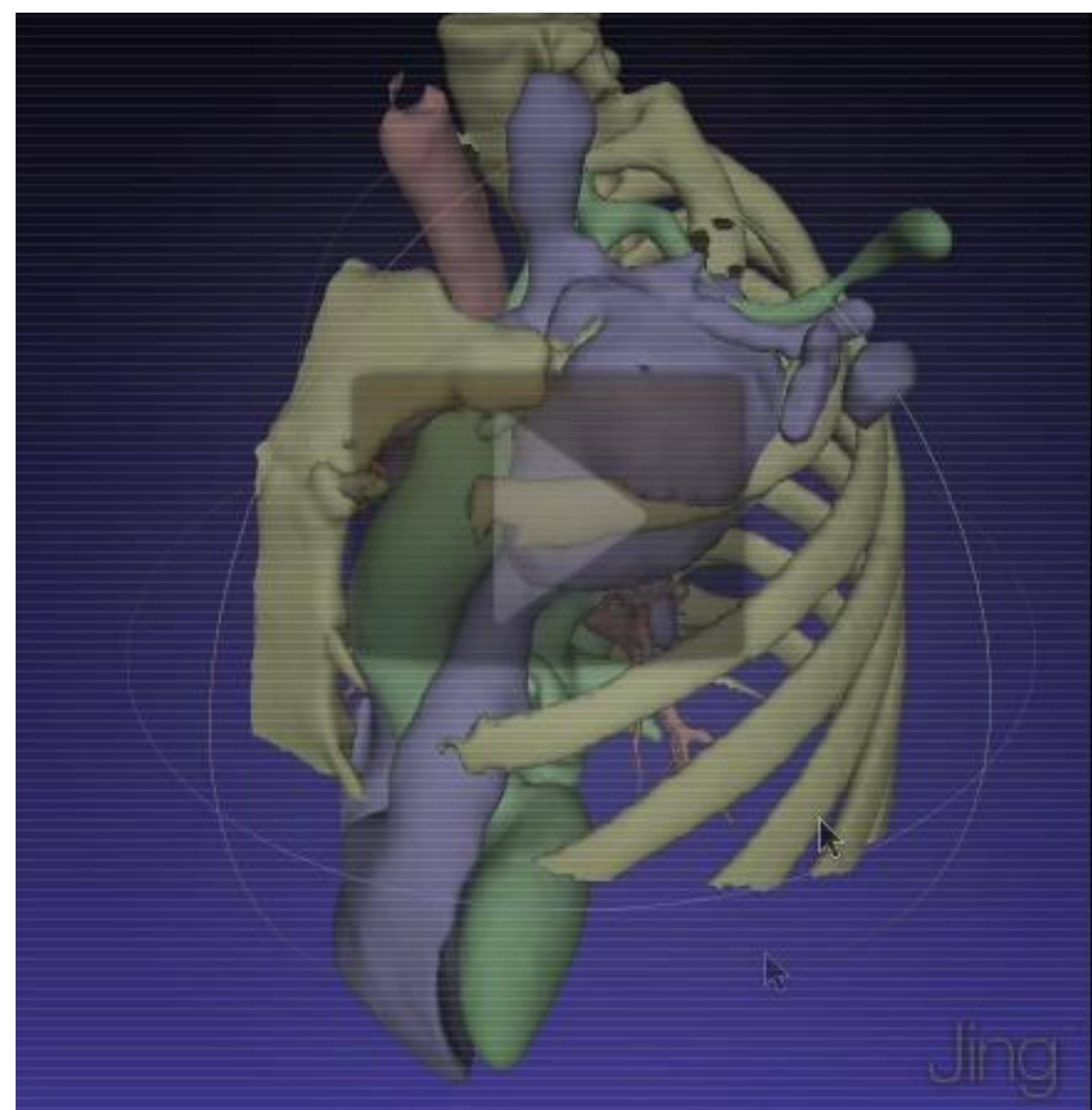
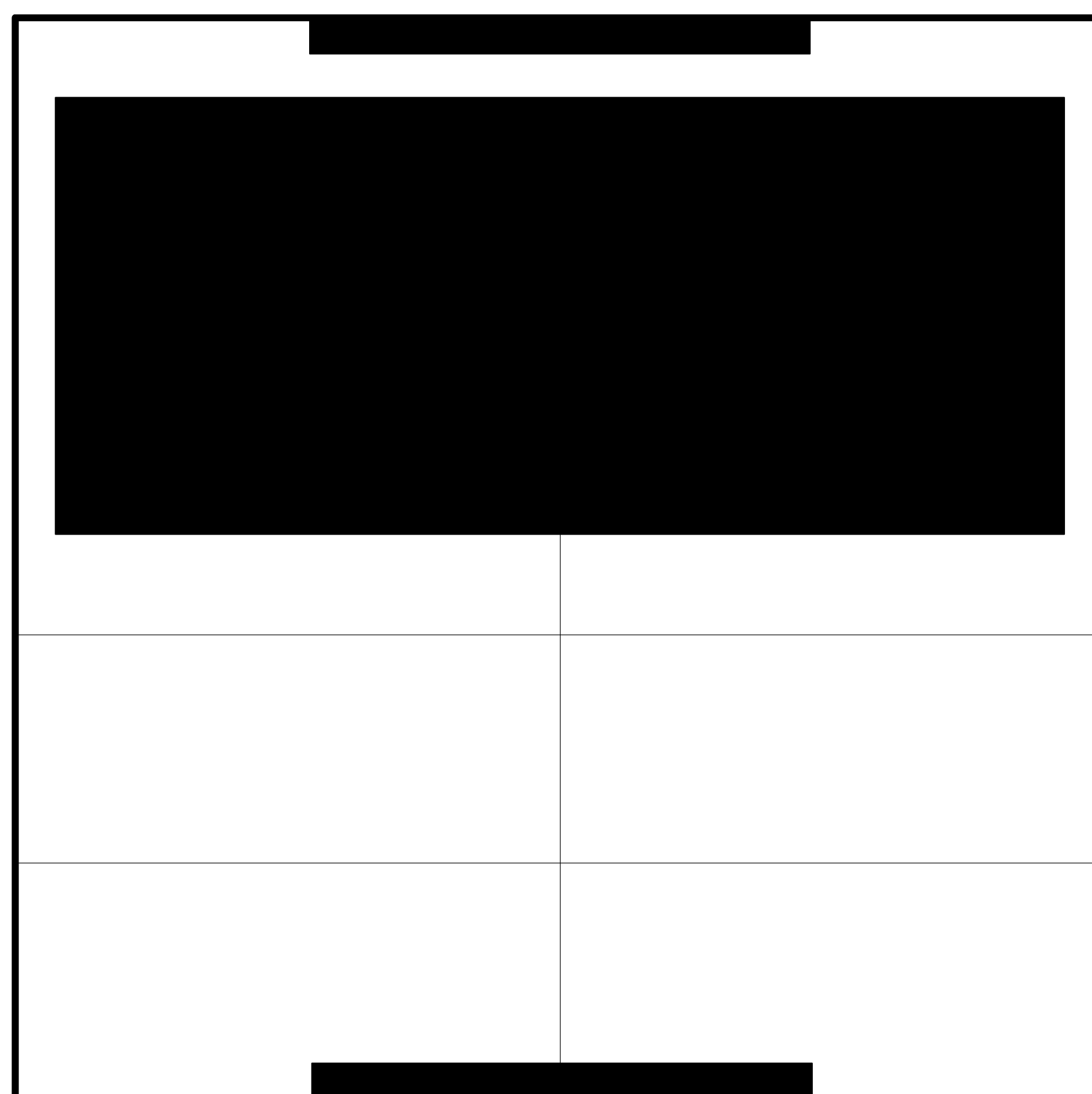
Optimización de los parámetros de TC y/o RM para la obtención de imágenes DICOM de calidad

2. Segmentación

Identificación, reconstrucción, análisis y catalogación de las diferentes estructuras previa a la generación de un STL

3. Generación STL

Ajuste del volumen de impresión previa a la generación del STL. Crítico a la hora de definir el tiempo de impresión.



6. Preparación del modelo 3D

Limpieza, evaluación e instilación de acrílicos y polímeros para incrementar su dureza.

5. Impresión 3D

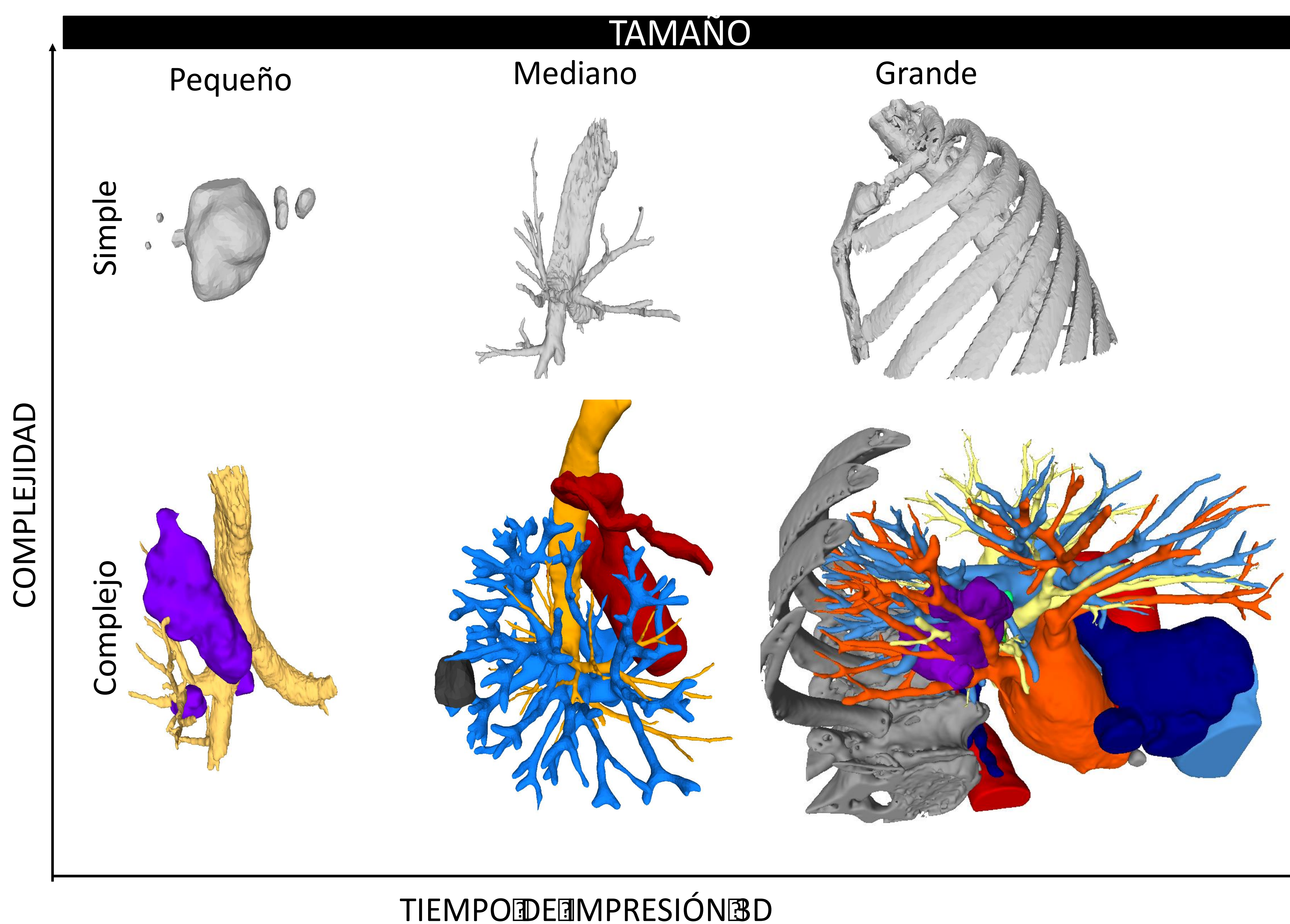
Determinación del modelo de impresión y material o materiales así como coloración del modelo a imprimir.

4. Optimización STL

Post-procesado de la malla para eliminar errores o imperfecciones de la segmentación, suavizado de la malla y adquisición de color, textura y transparencia

1 Introducción al 3D printing

Flujo de trabajo y materiales



LO BUENO SI BREVE, DOS VECES BUENO

Cuanto mayor y más complejo sea el modelo 3D más costoso (tiempo y material) resulta su impresión.

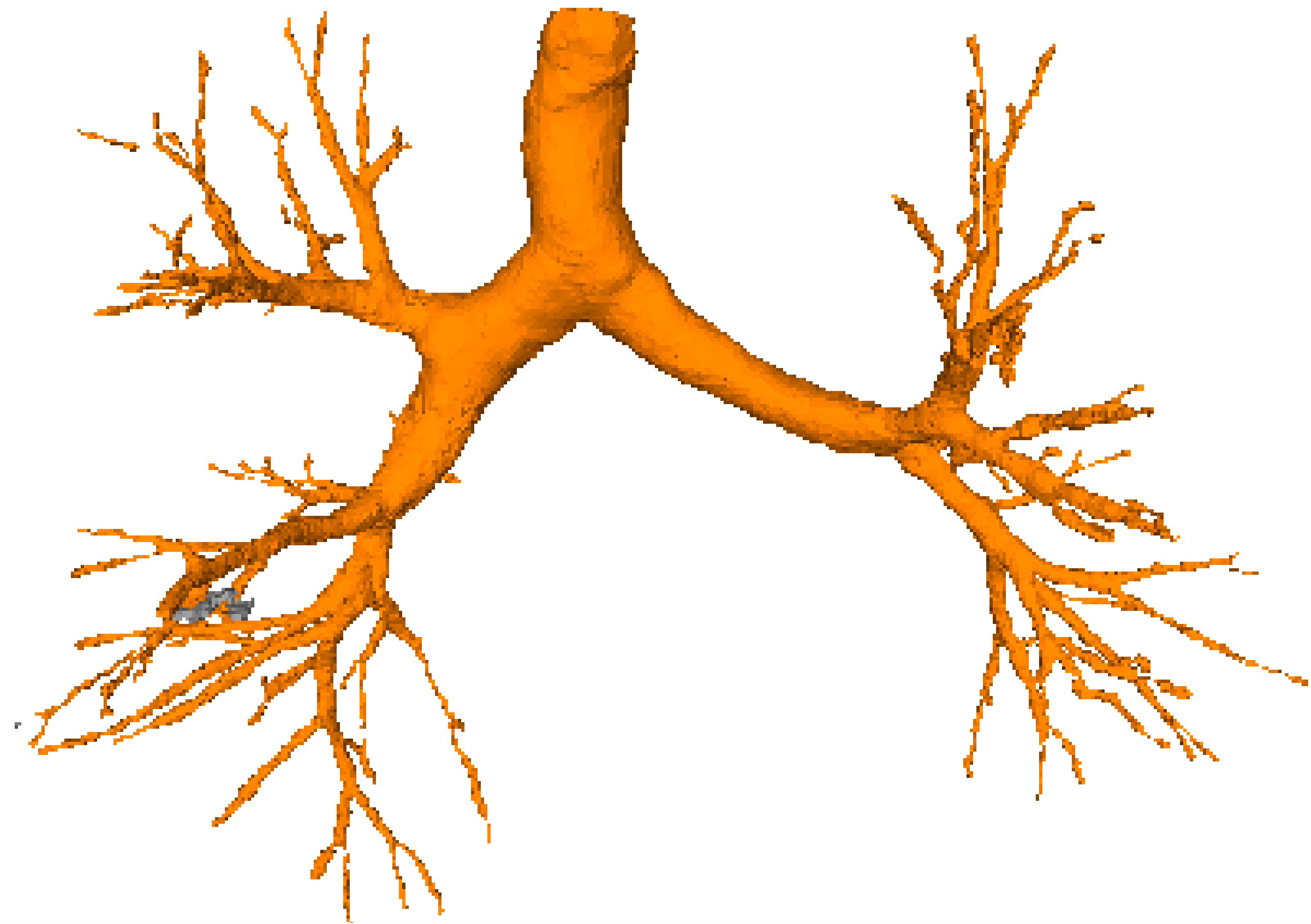
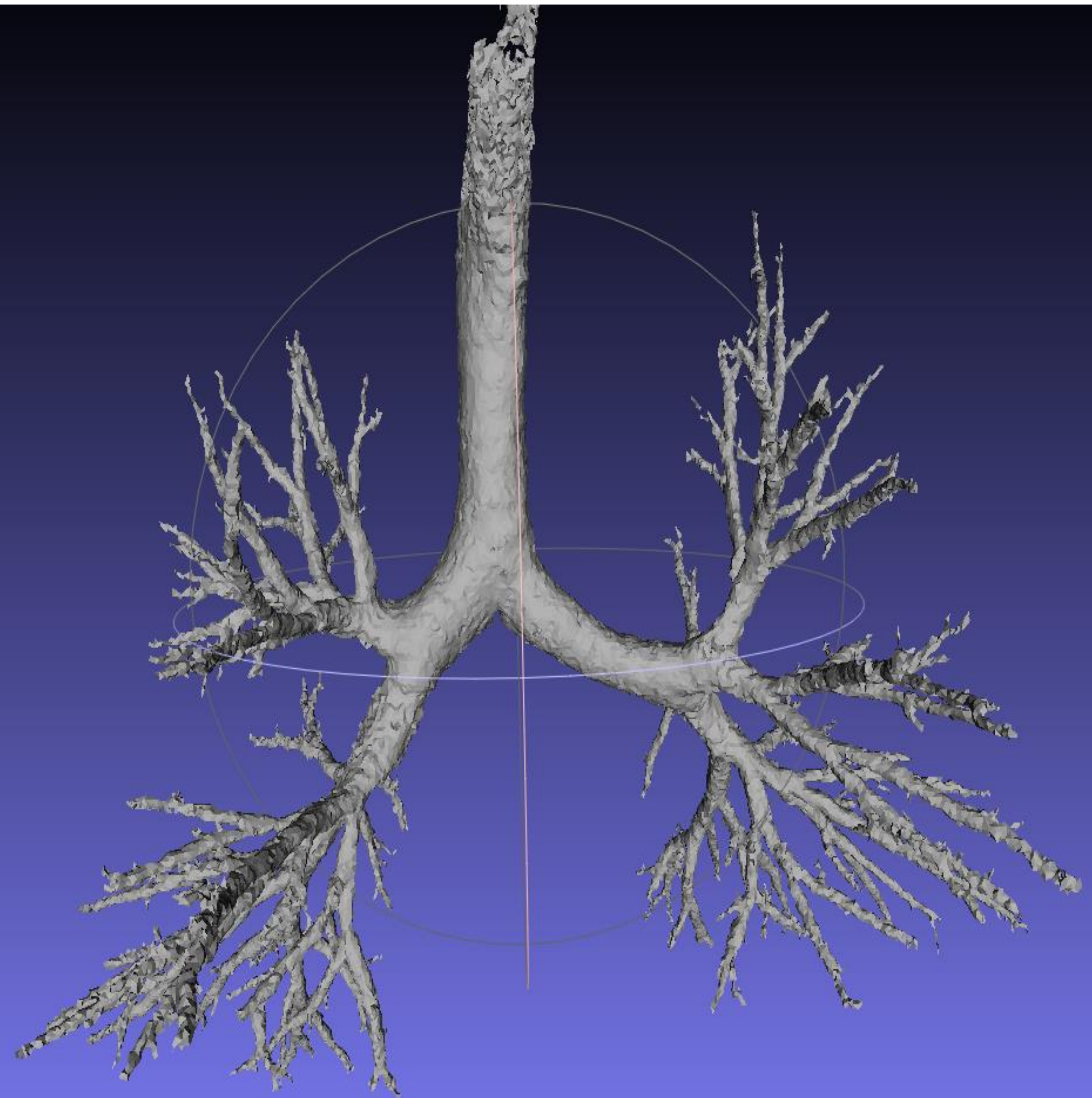
CENTRARSE EN LO QUIRÚRGICAMENTE RELVANTE

Relación de técnicas de impresión, materiales y características

Material	Impresora Resolución	Dureza	Ventajas	Desventajas
MATERIAL JETTING Compuesto base acrílica y solidificación con rayos UV	Object 500 Connex Z: 0,03 mm X-Y: 0,05 mm	++	Versátil Multimaterial Policromático Biocompatibilidad corta duración (guías quirúrgicas)	Coste Tiempo
MATERIAL EXTRUSION Compuesto termoplástico diluido y extruido	Fortus 500 mc Z: 0,1-0,5 mm X-Y: 0,1-0,4 mm	+++	Poco coste Amplia distribución 1-2 materiales Policromático Rígido/flexible	Tiempo Poca resolución espacial Permeación con líquidos
VAT PHOTOPOLIMERIZATION Fotopolímero solidificado con rayos UV	ProJet 7000 Z: 0,02- 0,2 mm X-Y: 0,075-0,2 mm	Liso	Modelos vasculares Biocompatibilidad	Monomaterial Difícil extracción
BINDER JETTING Líquido adhesivo inyectado sobre yeso o polvo cerámico	ProJet 660 pro Z: 0,05-0,1 mm X-Y: 0,05 mm	+++	Policromático Formas complejas No soporte	Fragilidad →infiltración acrílicos elastoméricos Monomaterial
POWER RED FUSION Polvo plástico, cerámico, plástico, metálico o de vidrio sinterizado con láser potencia	EoS M400 Quad Laser metal printer Z: 0,1-0,2 mm X-Y: 0,075-0,2 mm	+++	Bioimplantable Aleación metal No soporte	Coste Complejidad

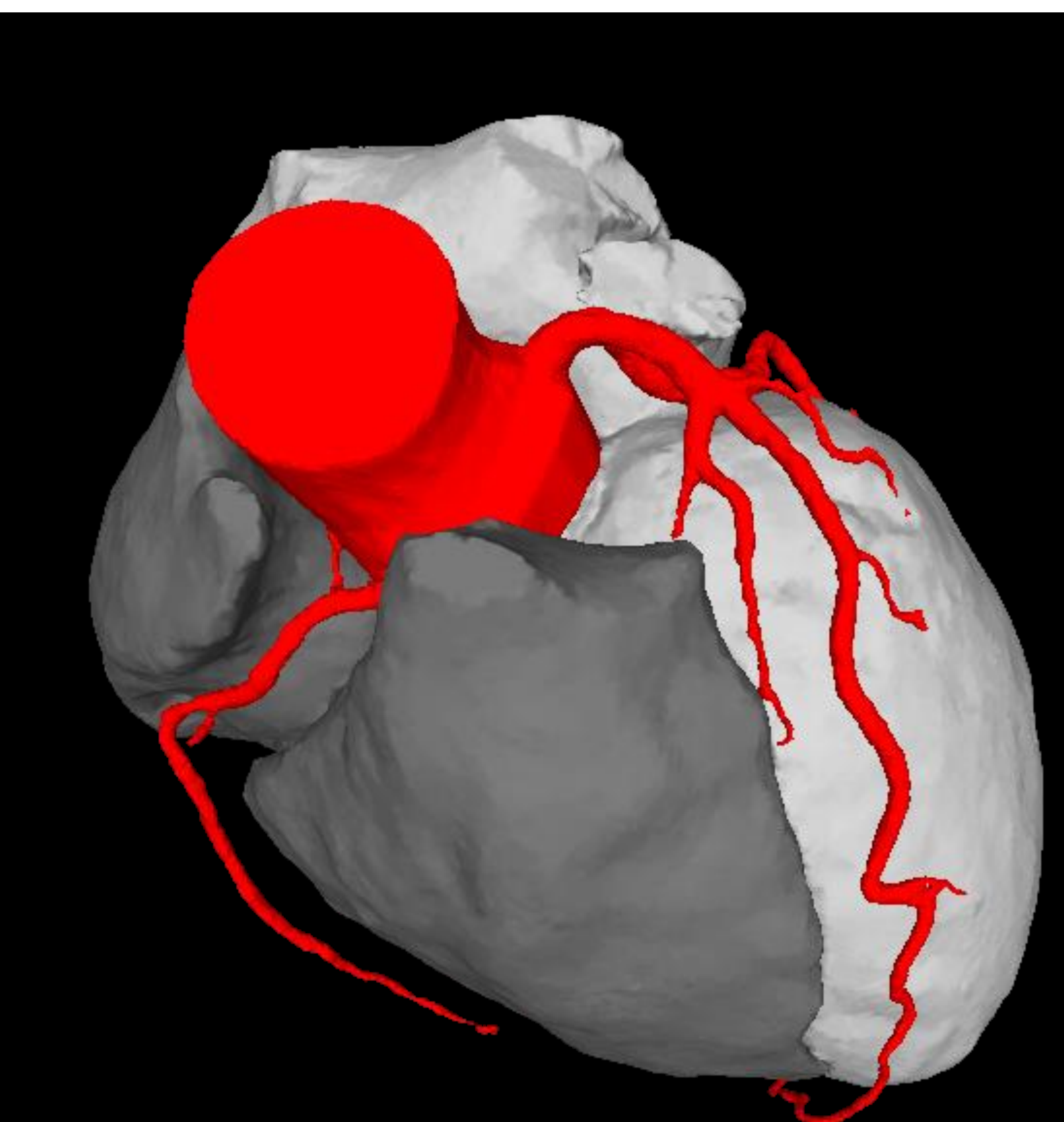
2 Técnica de adquisición dirigida a 3D printing

Tomografía computarizada



La calidad de la adquisición tomográfica determina la fiabilidad y exactitud del modelo

Técnica	TCMD 16 cortes	TCMD 128 cortes (64 x 2)
kV/mAs	120 kV/250-440 mAs	120 kV/70-300 mAs
Modulación dosis	CareDose 4D	CareDose 4D
Colimación	16 x 0.625 mm	64 x 2 x 0.625 mm
Rotación tubo / pitch	0.6 s / 1:1.75	0.75 / 1:0.895
Control contraste	Bolus Tracking	Bolus Tracking
Umbral de realce	70 UH (Aorta descendente)	100 UH (Aorta descendente)
Reconstrucción	1 mm / 0,8 mm	1 mm / 0,8 mm
Filtro de reconstrucción	Baja y alta frecuencia	Baja y alta frecuencia
Algoritmo reducción ruido	si	si

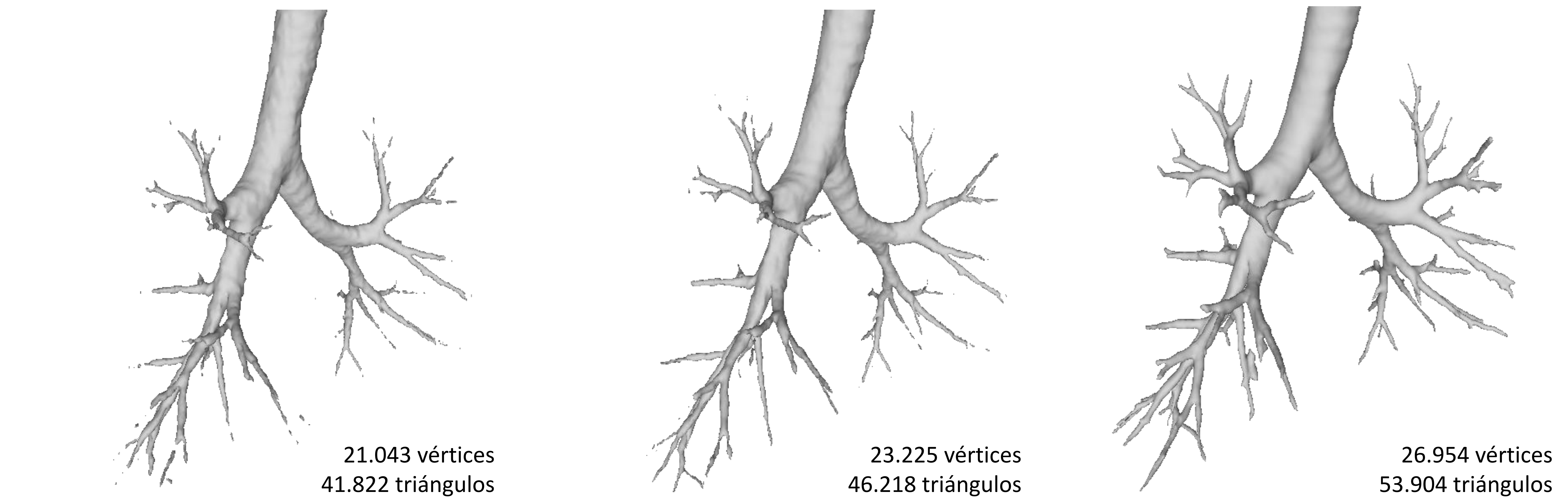
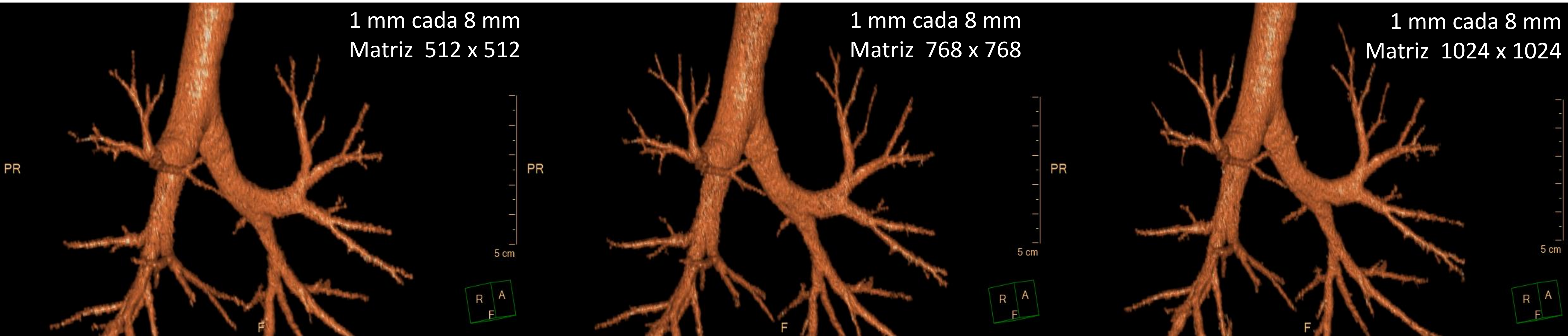


STL model file of the heart obtained from and ECG-gated coronary CTA.

Cuando exista afectación de estructuras cardíacas, la sincronización con ECG puede ser de gran ayuda para su valoración

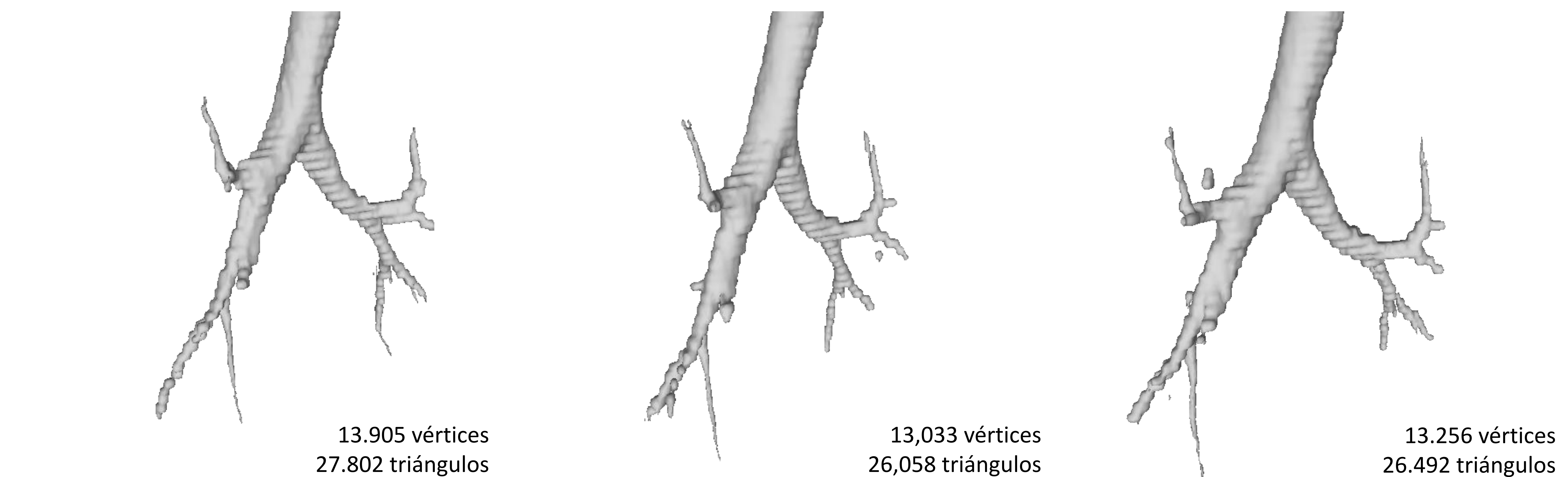
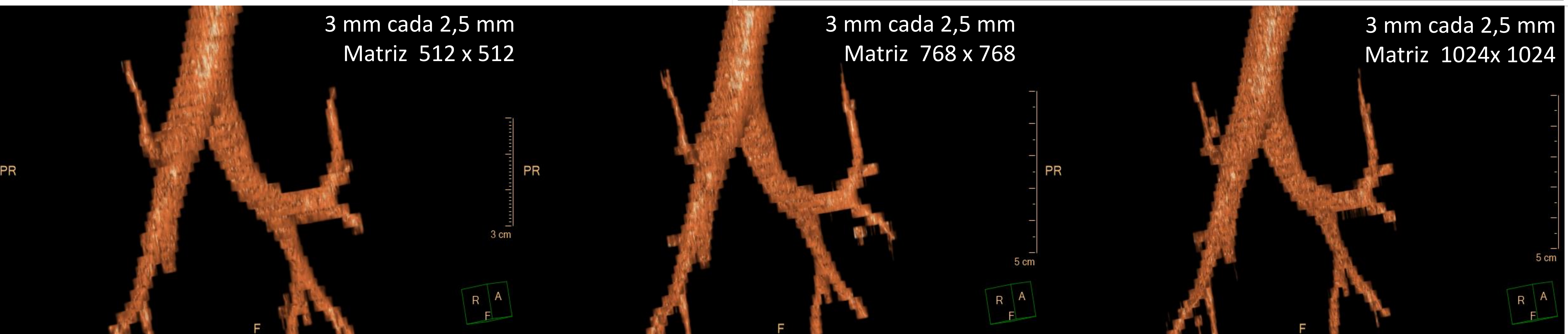
2 Técnica de adquisición dirigida a 3D printing

TC: Importancia de la reconstrucción



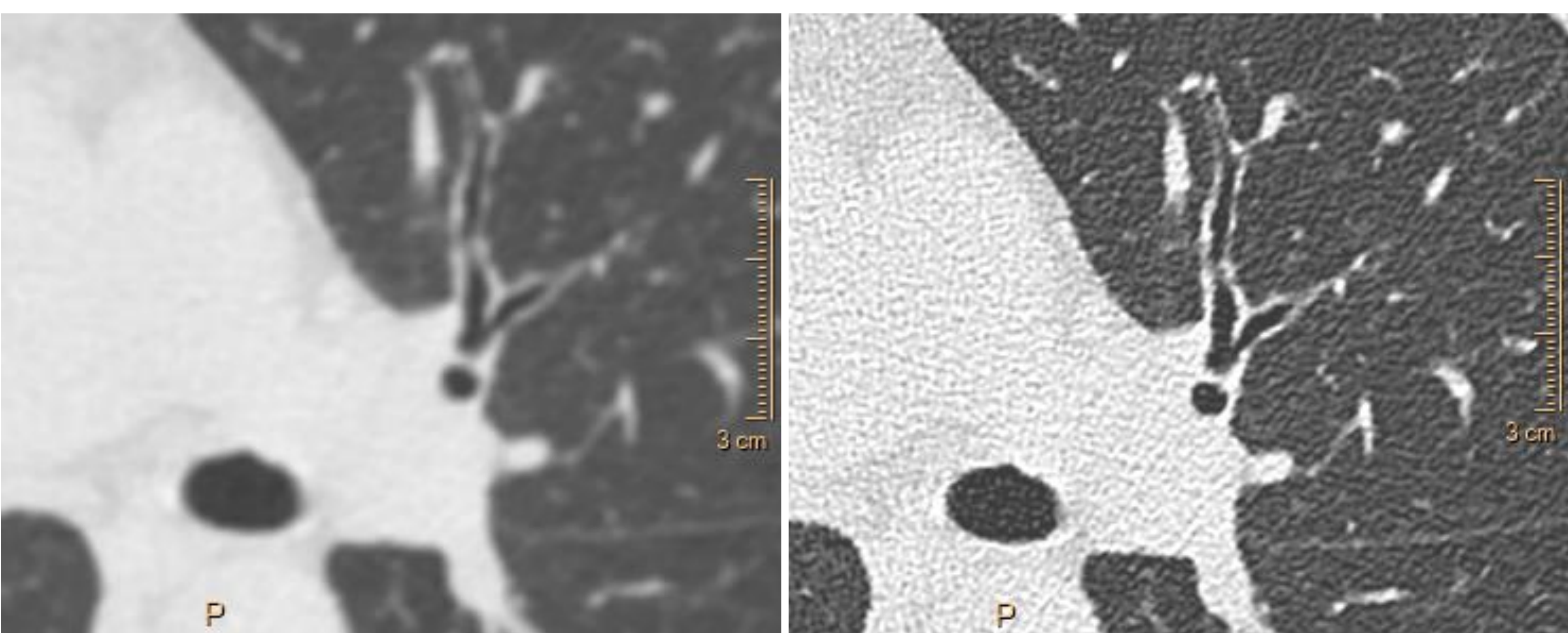
Ejemplo de reconstrucción de vía aérea del mismo paciente utilizando diferentes grosores de corte y matrices reconstrucción. Nótese la diferencia en el número de vértices y triángulos obtenidos.

Cuanto mayor sea la matriz de reconstrucción menor será el tamaño del pixel. Junto con el grosor de corte incrementa nuestra resolución espacial



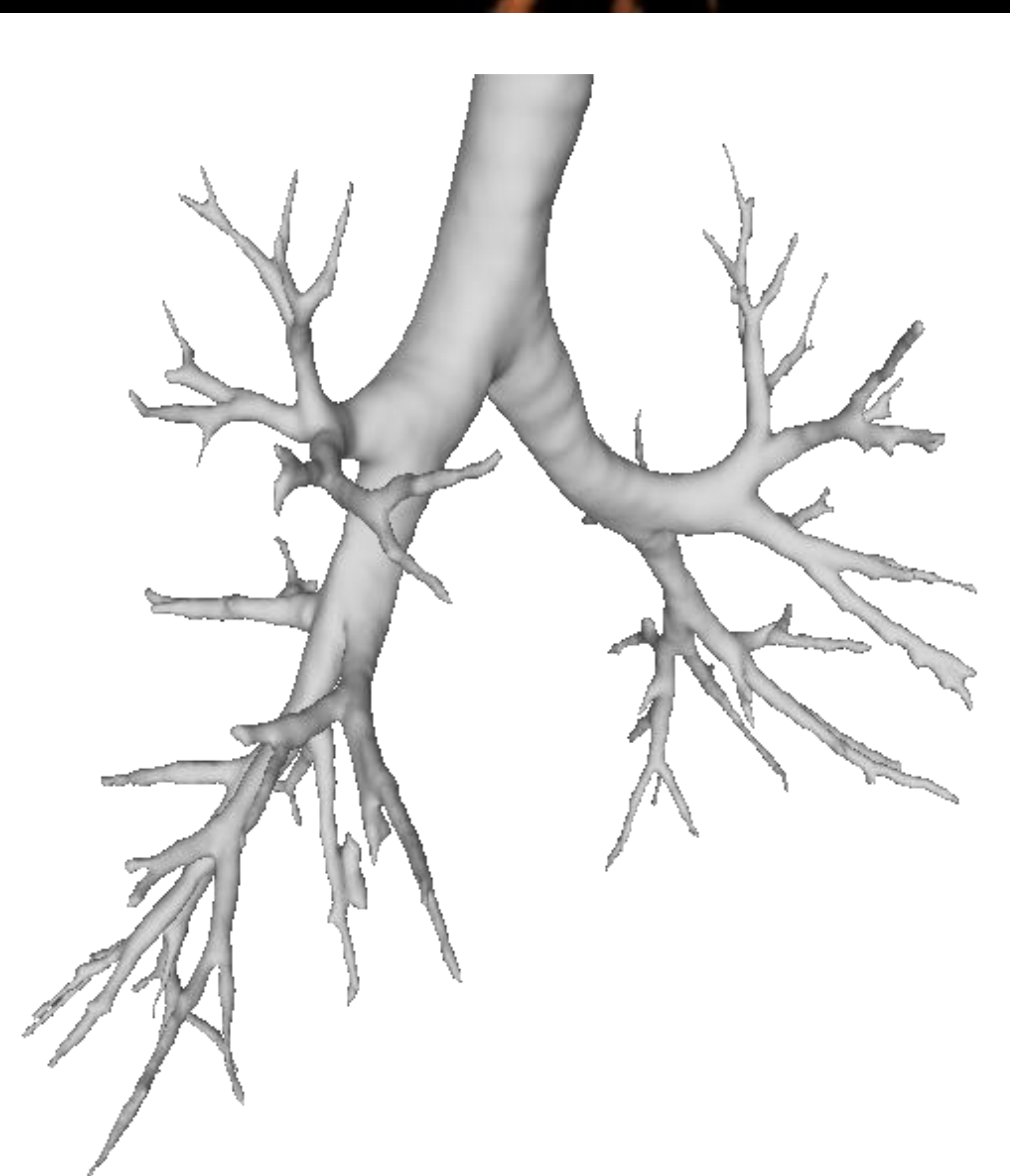
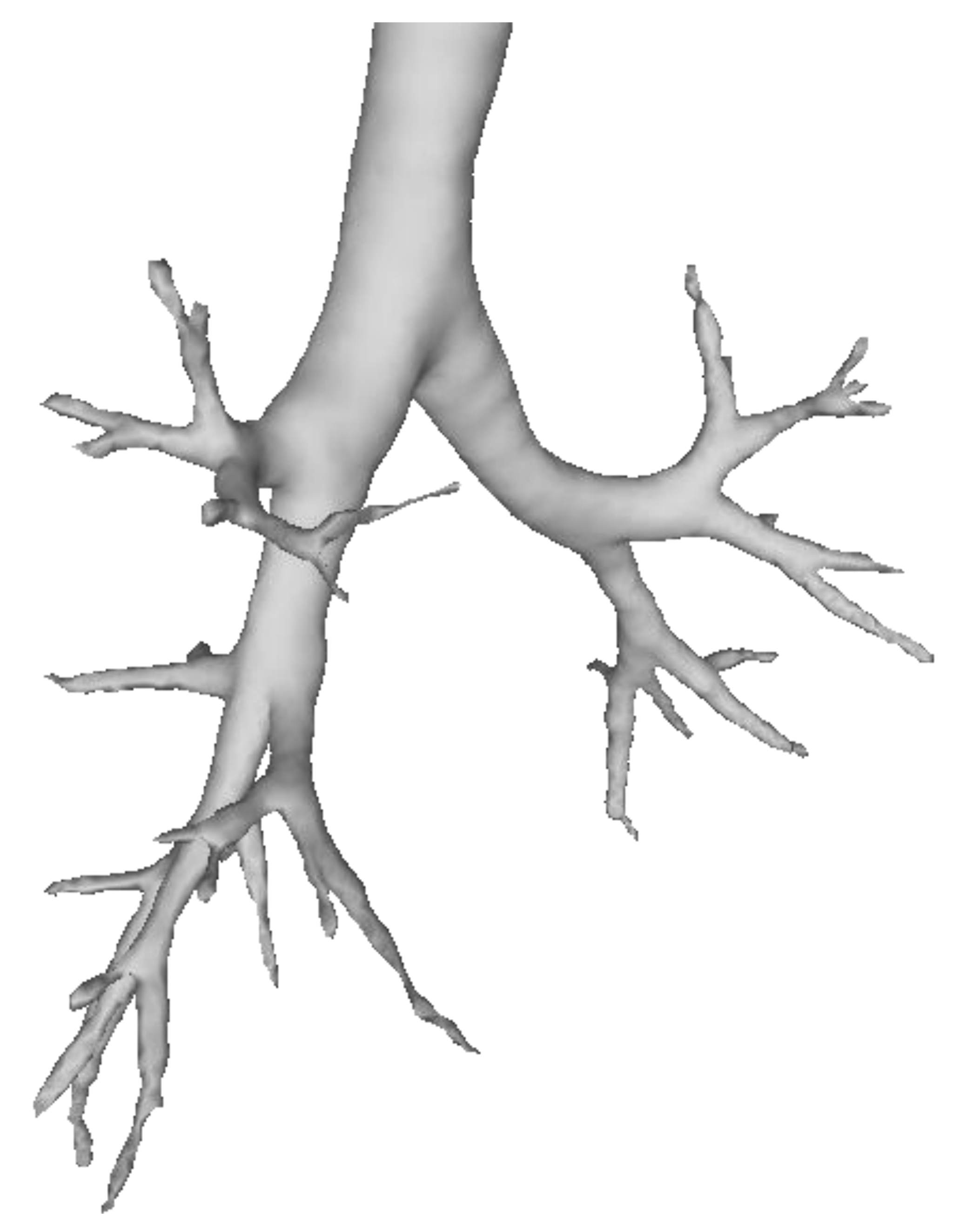
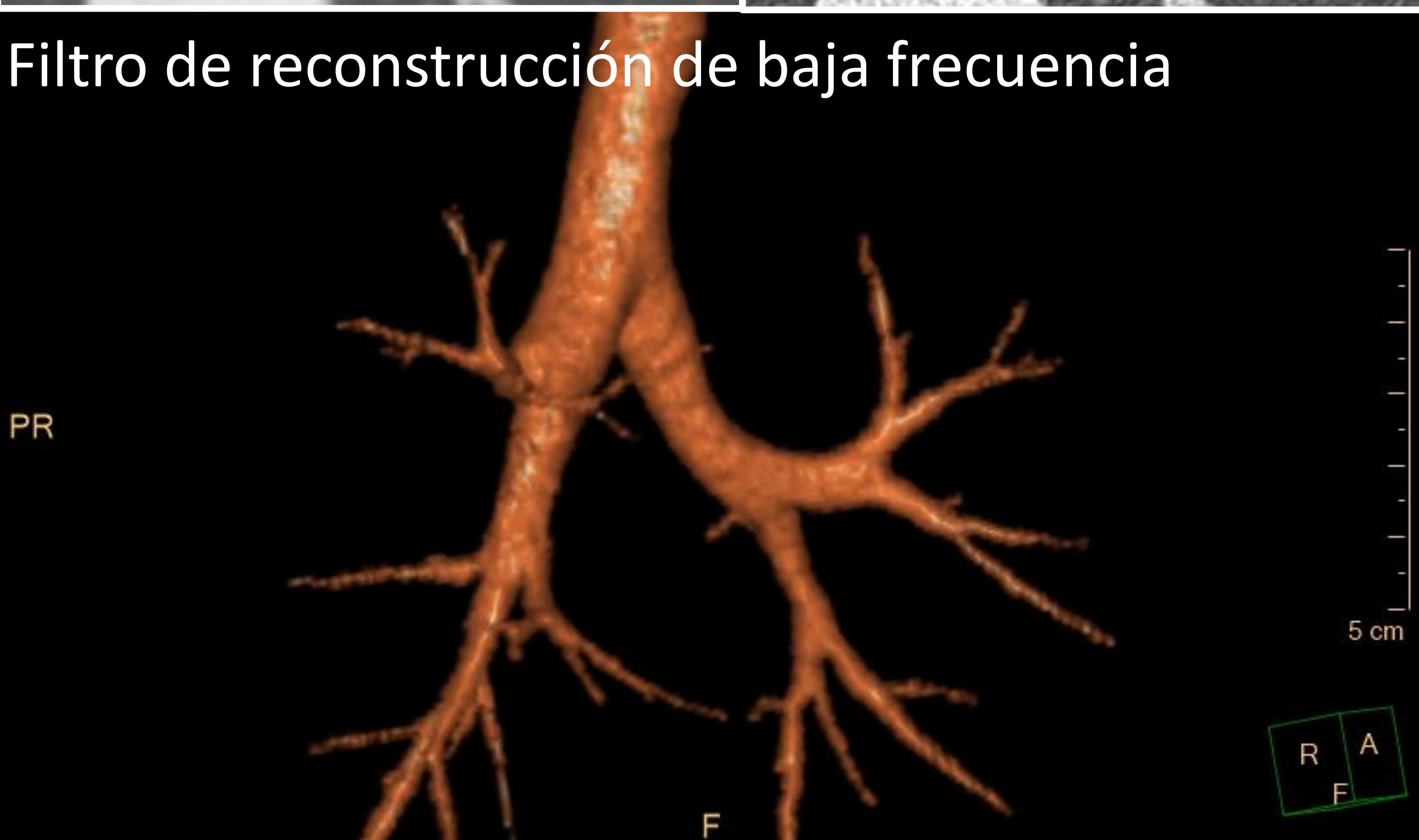
2 Técnica de adquisición dirigida a 3D printing

TC: Reconstrucción de baja y alta frecuencia



Es necesario adecuar el filtro de reconstrucción a la estructura que vayamos a valorar

Filtro de reconstrucción de baja frecuencia



Filtro de reconstrucción de alta frecuencia



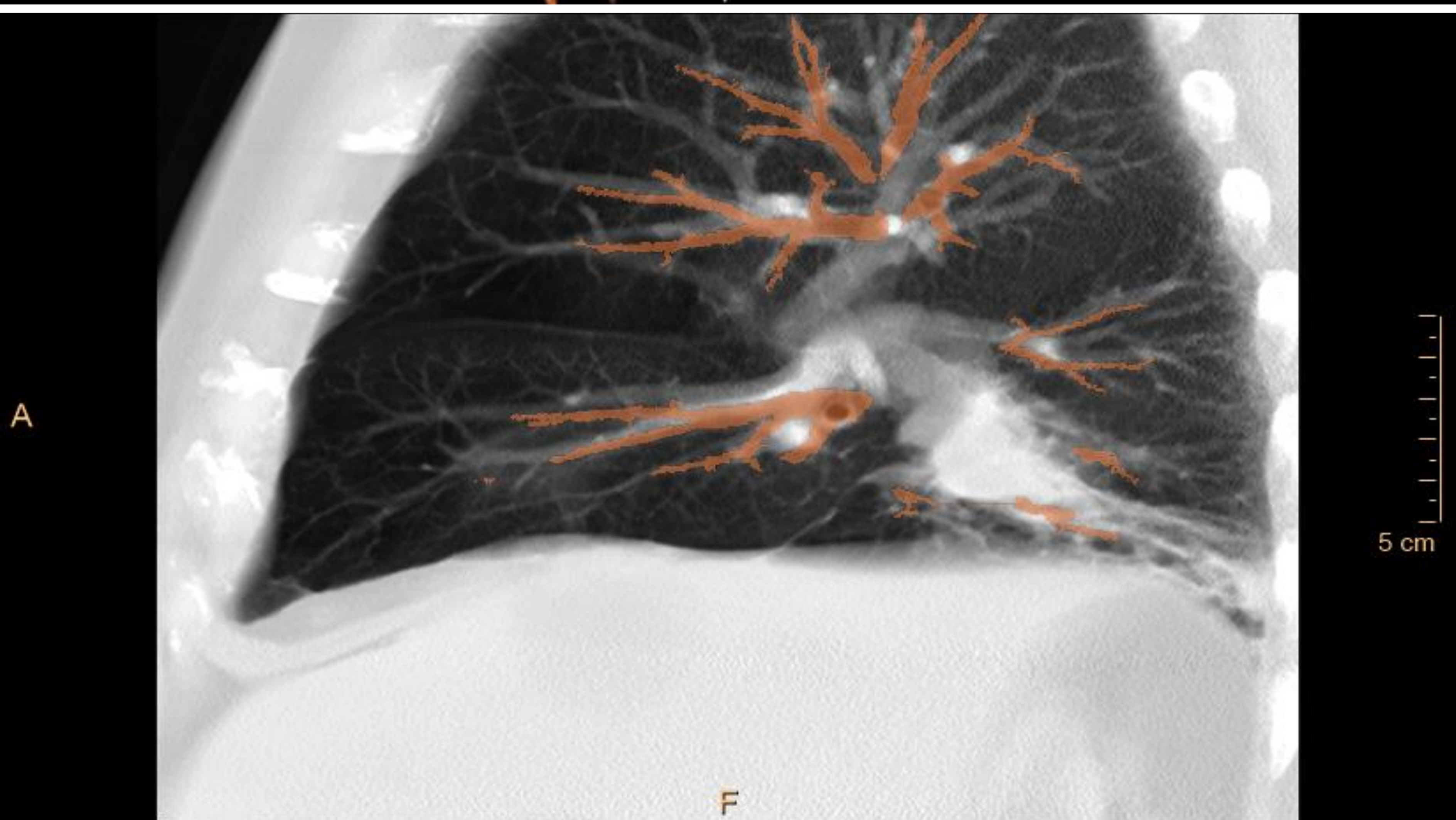
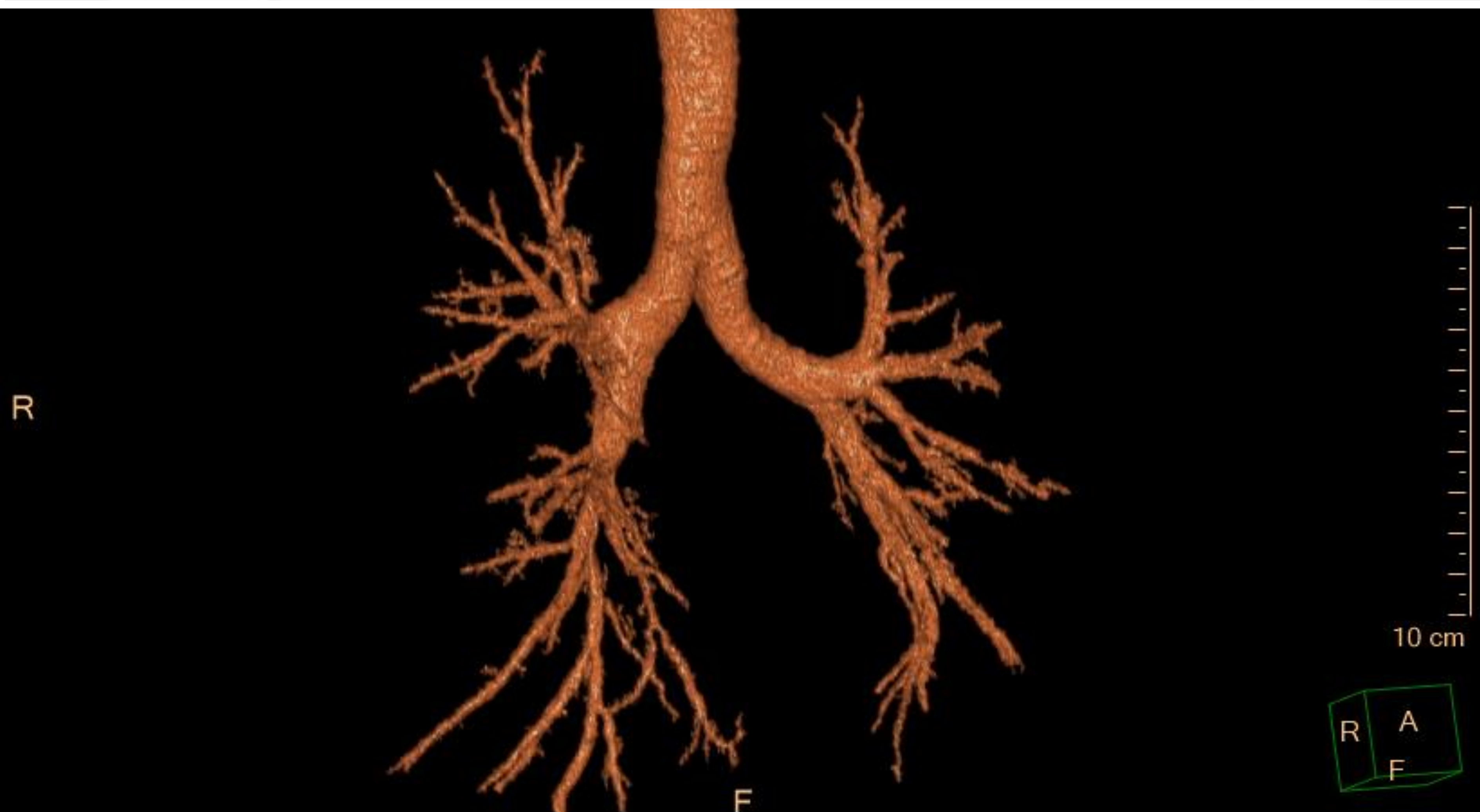
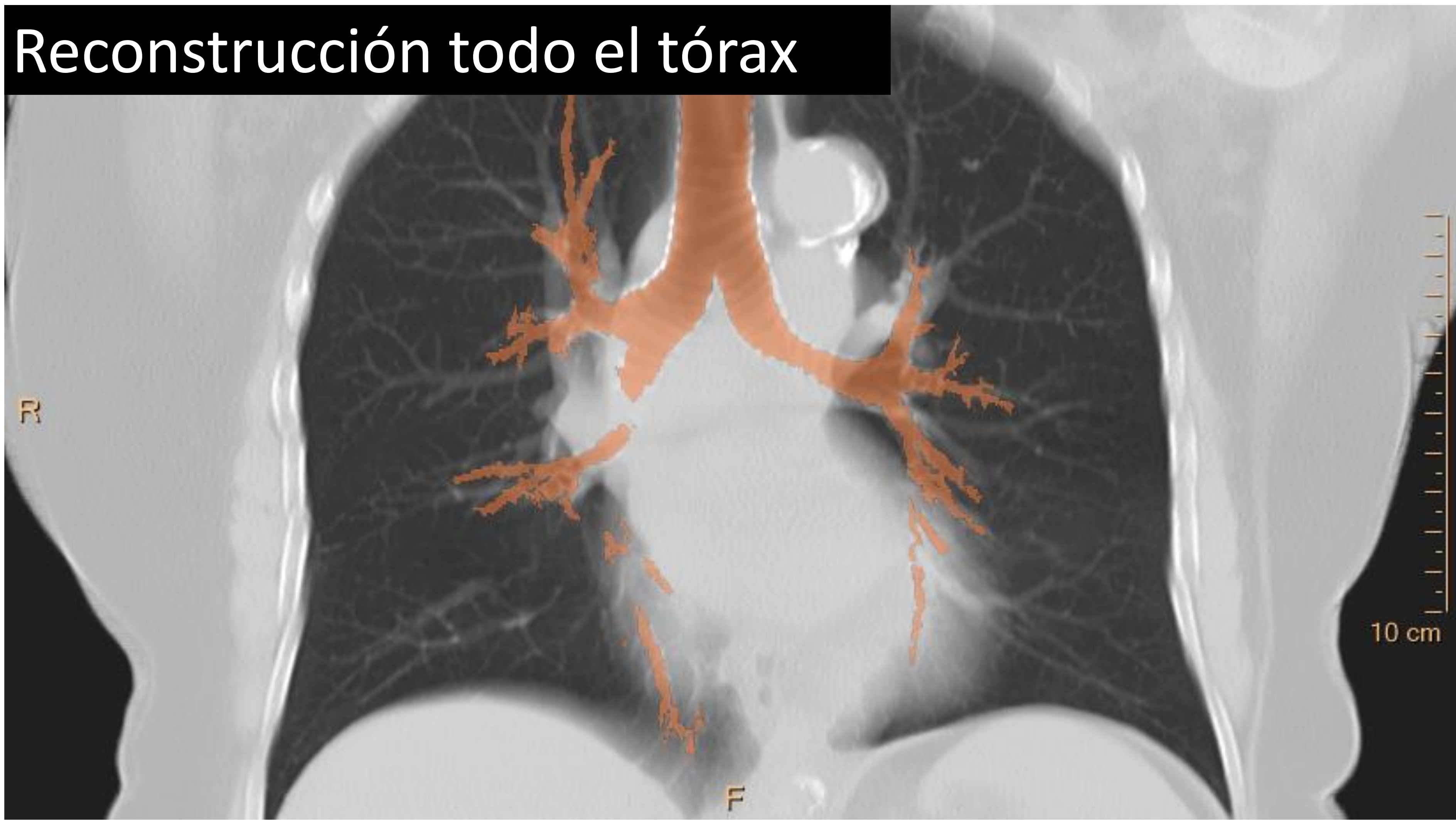
Reconstrucción y segmentación de vía aérea del mismo paciente utilizando un filtro de reconstrucción de baja (no adecuado) y alta (adecuado) frecuencia. Nótese la diferencia en el número de ramificaciones obtenidas.

La optimización previa del filtro de reconstrucción al órgano o lesión a segmentar va permitir incrementar nuestra resolución

2 Técnica de adquisición dirigida a 3D printing

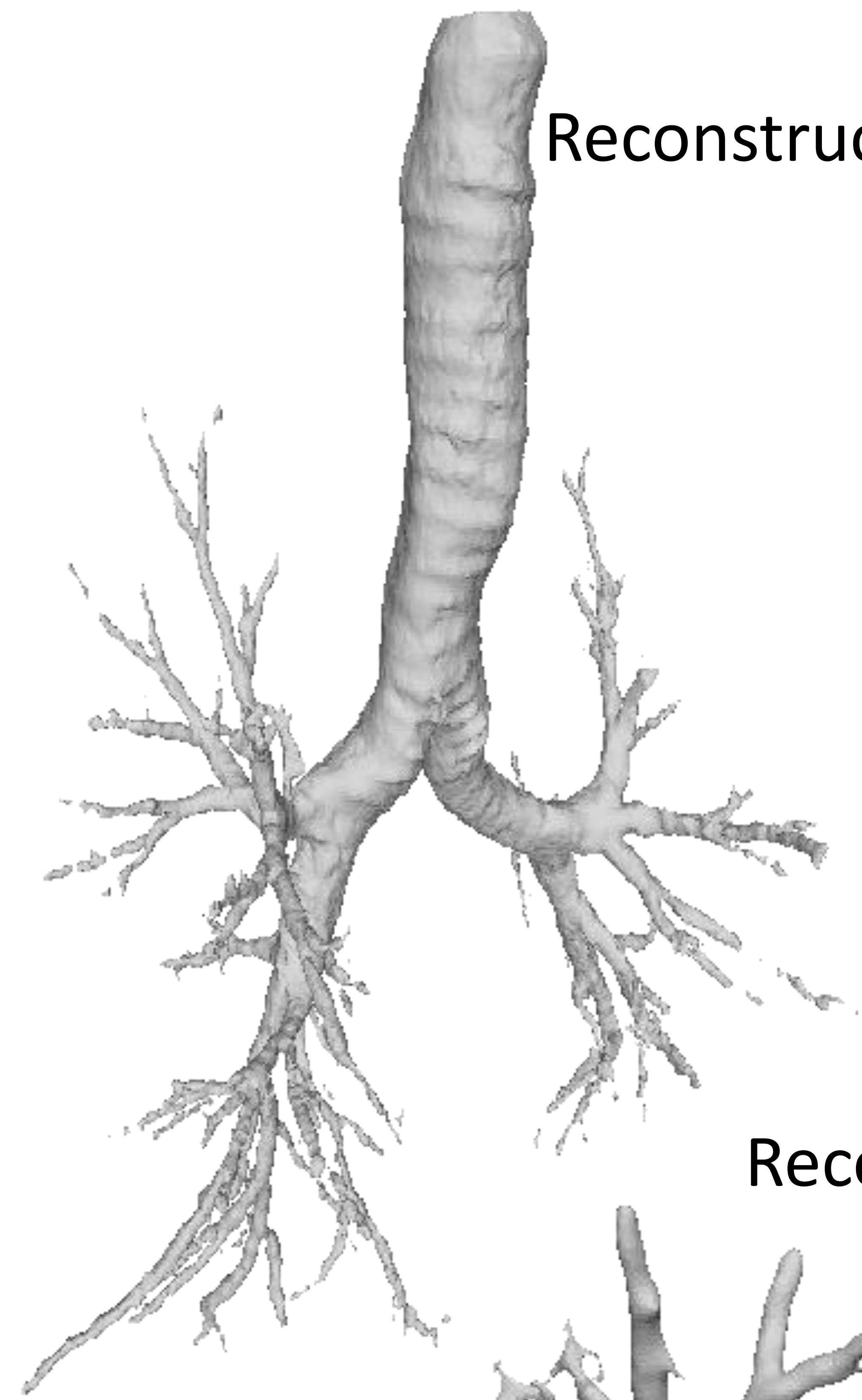
Impacto de FoV y matriz: Reconstrucción dedicada

Reconstrucción todo el tórax

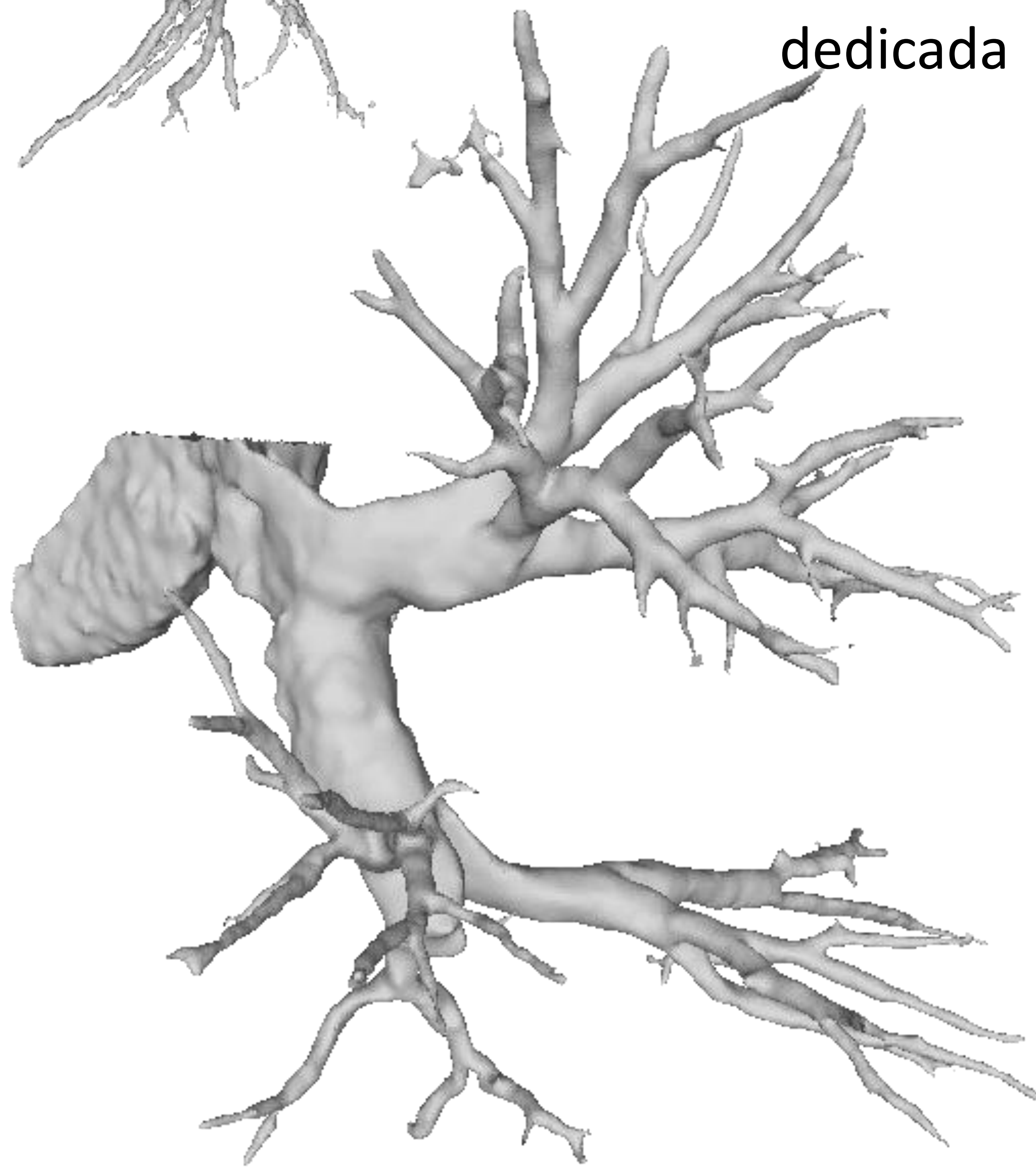


Reconstrucción dedicada

Reconstrucción global



Reconstrucción dedicada

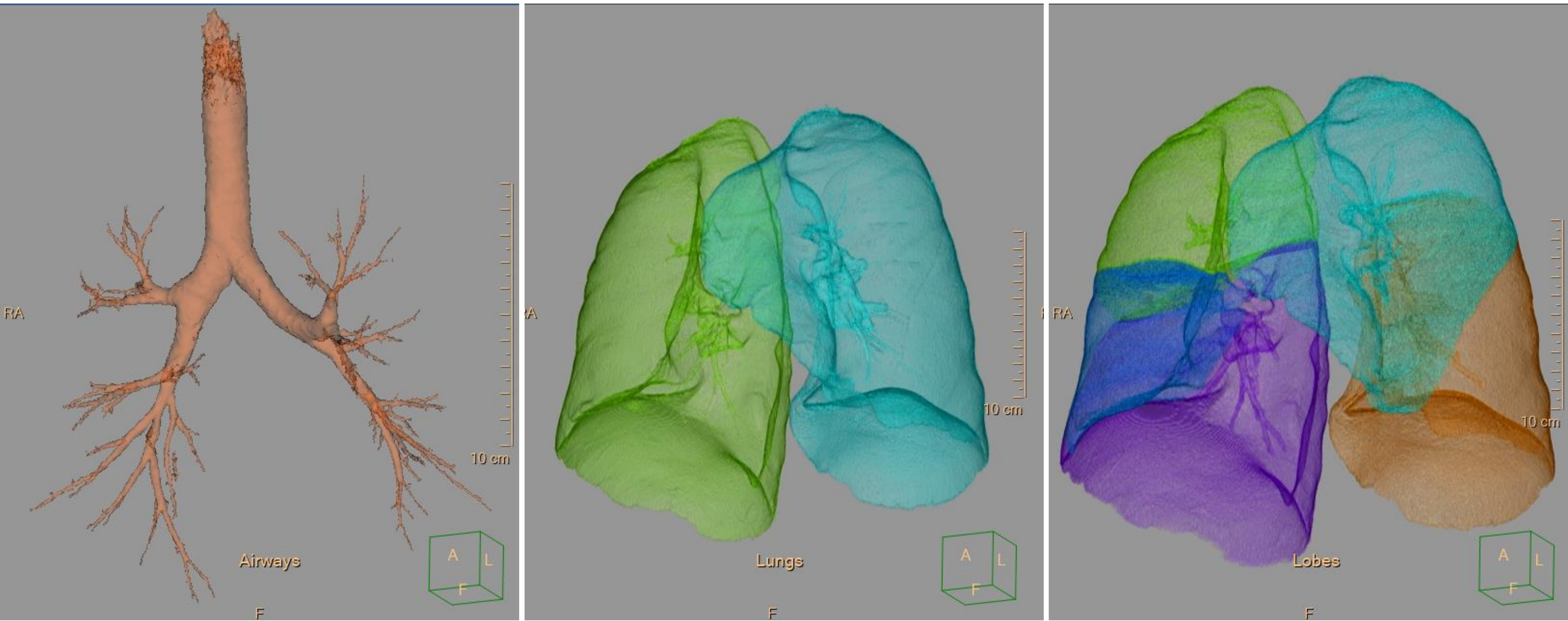


Defecto producido por lesión tumoral primaria pulmonar

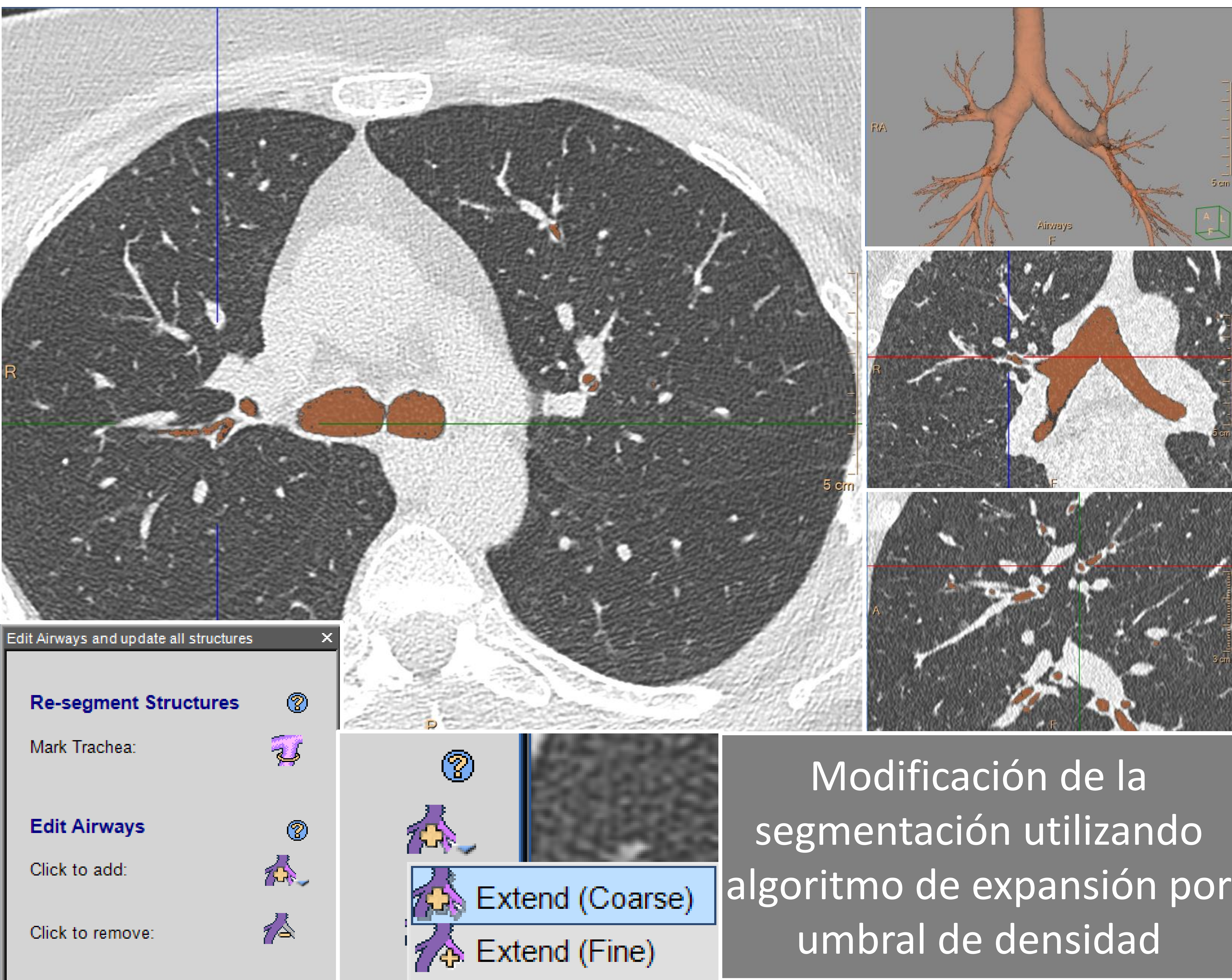
Con reconstrucciones dedicadas optimizamos nuestra matriz de reconstrucción al centrarse en el área de interés -> Obtención de estructuras vasculares y vía aérea de menor tamaño

3 Segmentación y 3D printing

Vía aérea y parénquima pulmonar



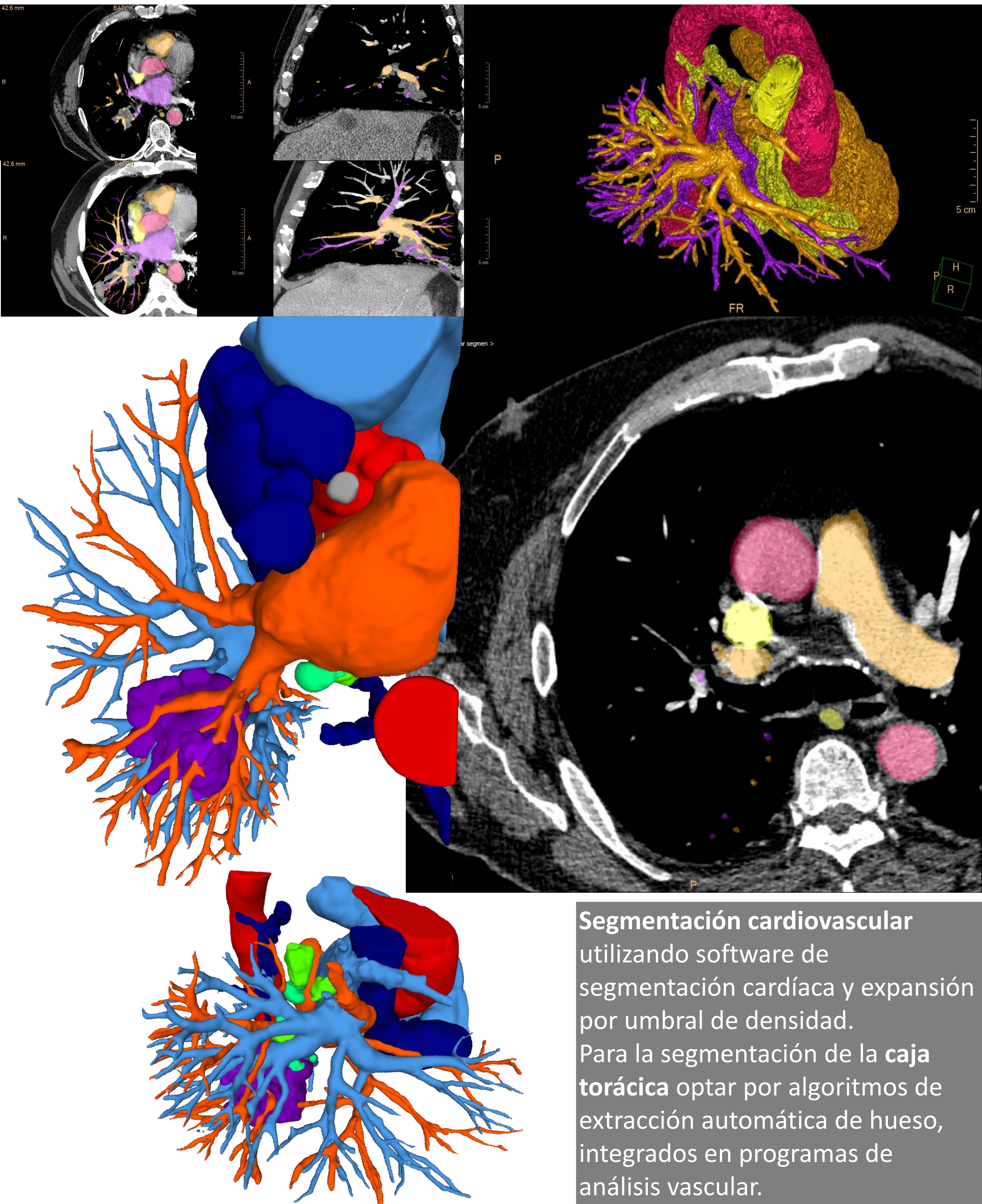
Segmentación semiautomática de vía aérea utilizando programa de valoración de enfisema. Segmentación lobar, pulmonar y de vía aérea en un clic.



Modificación de la segmentación utilizando algoritmo de expansión por umbral de densidad

3 Técnica de adquisición dirigida a 3D printing

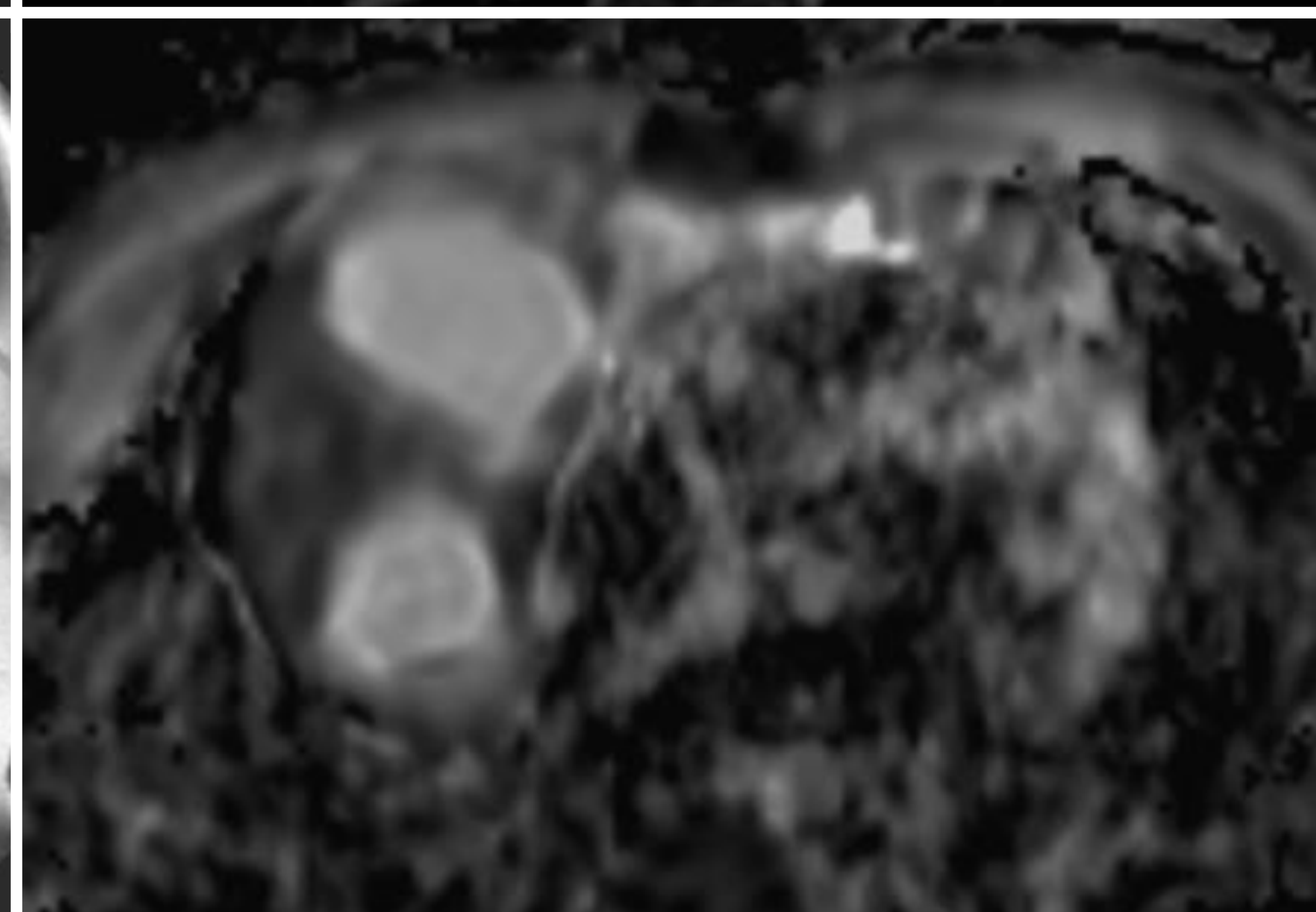
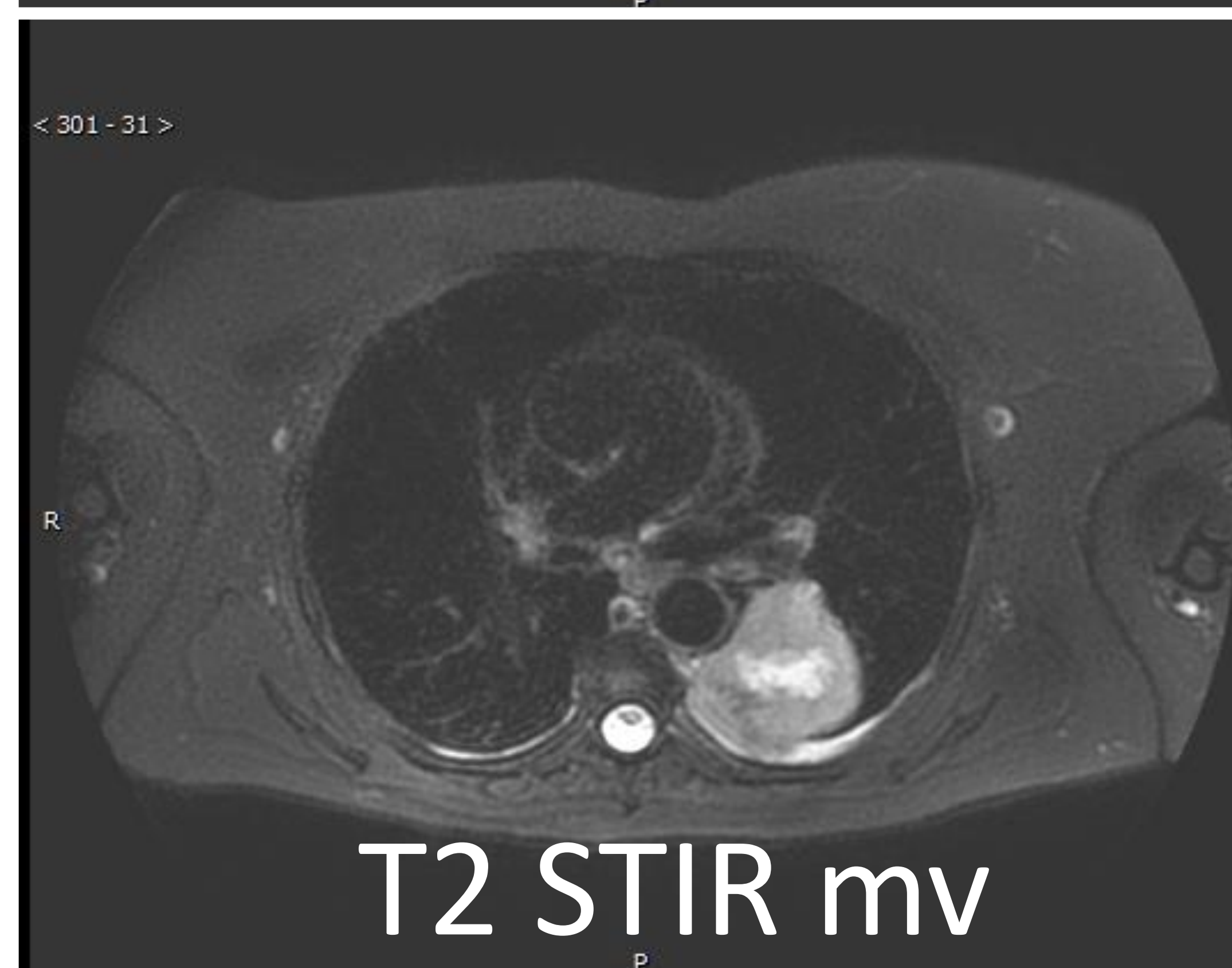
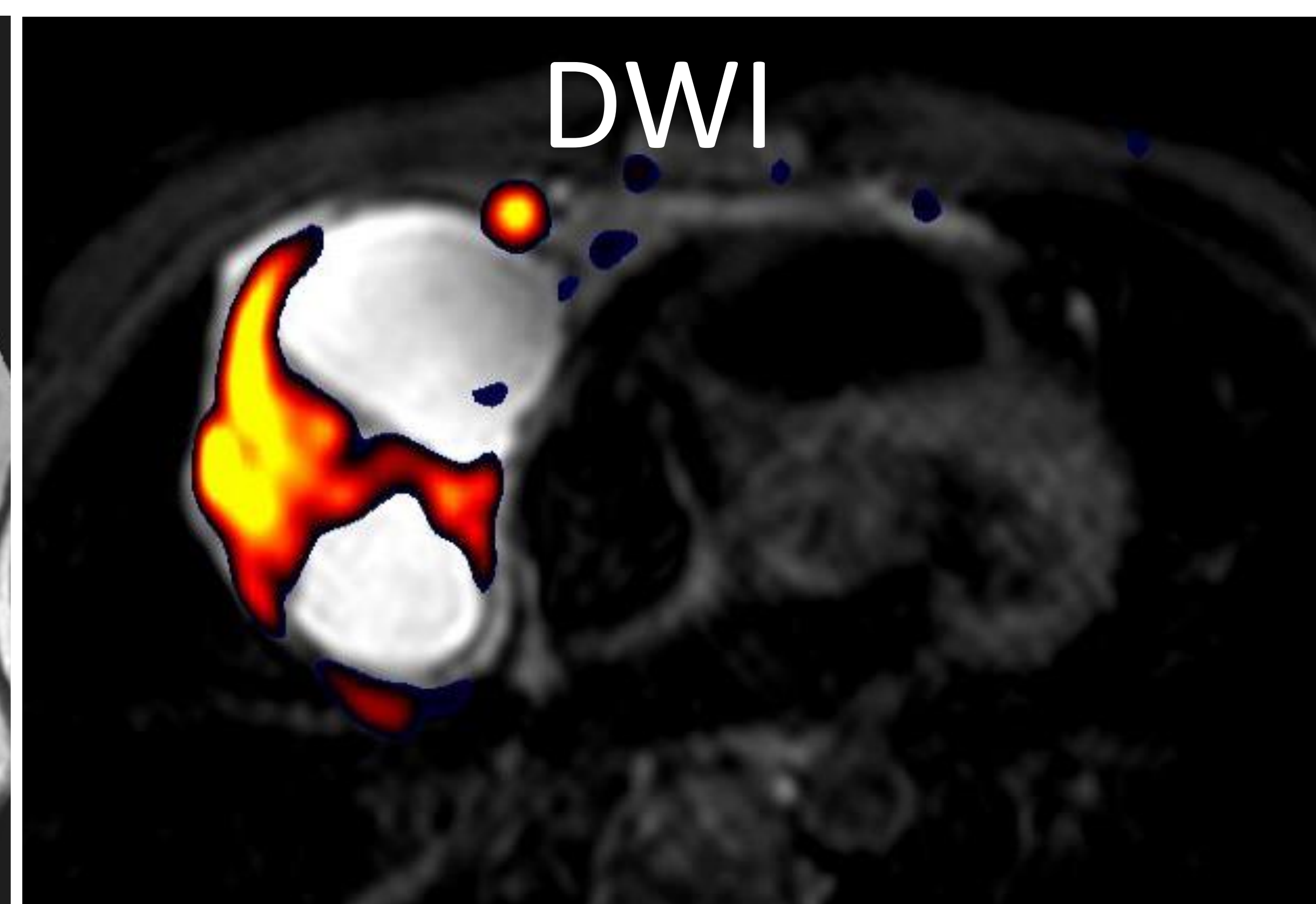
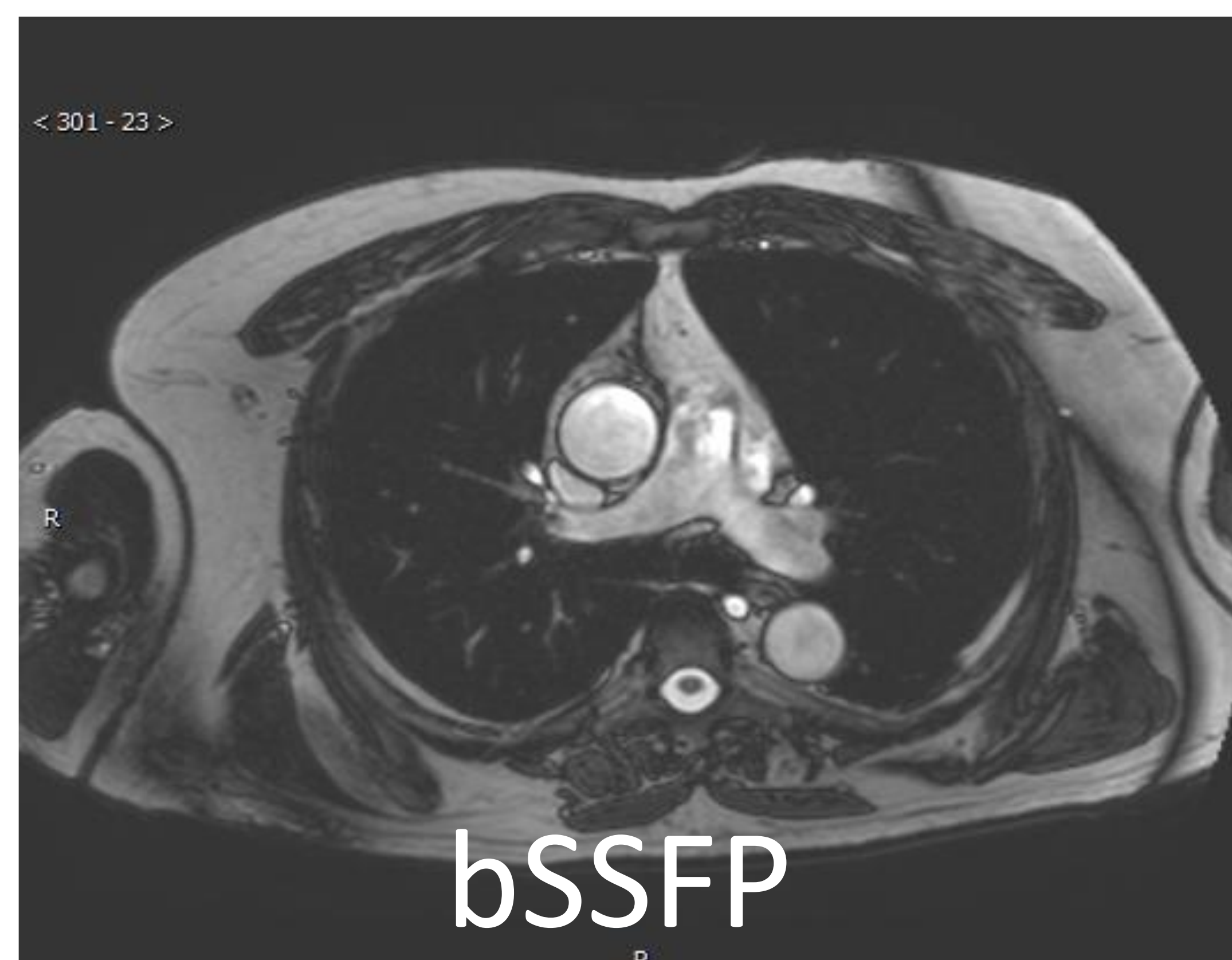
Segmentación cardiovascular y ósea



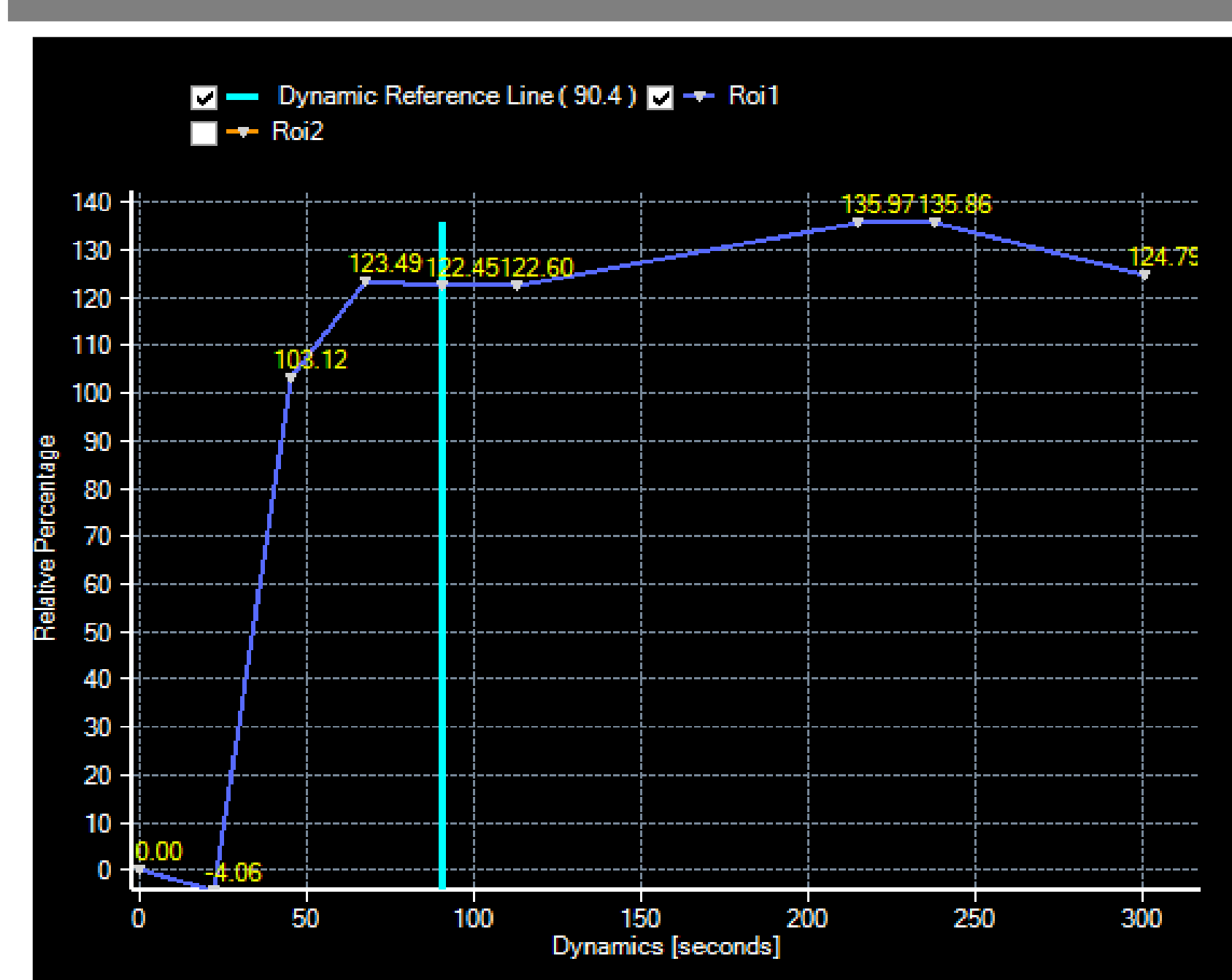
Segmentación cardiovascular utilizando software de segmentación cardíaca y expansión por umbral de densidad. Para la segmentación de la caja torácica optar por algoritmos de extracción automática de hueso, integrados en programas de análisis vascular.

4 RM torácica y 3D printing

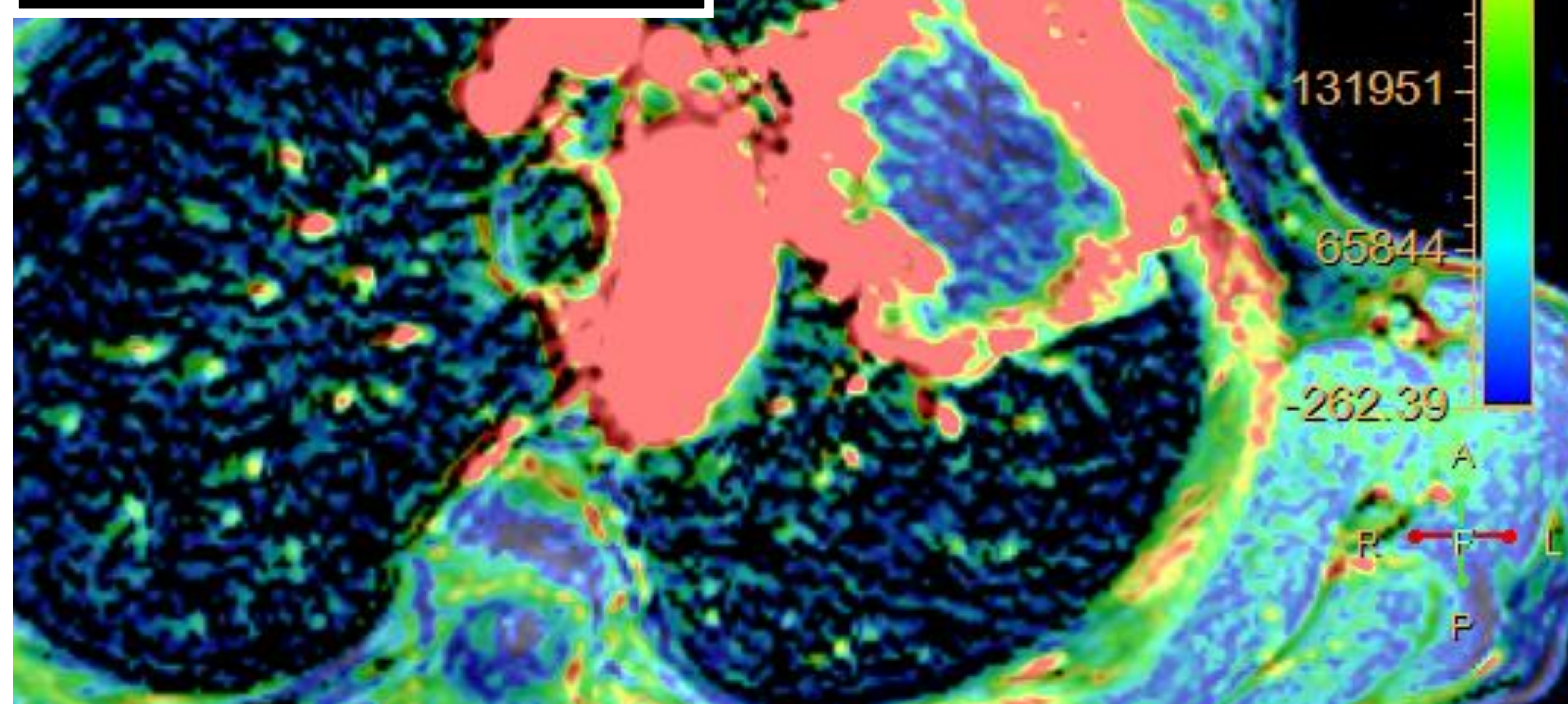
Protocolo de adquisición



- La RM torácica permite realizar una valoración integral de la patología oncológica torácica
- A un protocolo básico (SSFP, T1, T2 y T2 STIR) se añade difusión (DWI), perfusión (DCE-MR) y secuencias cine para completar la valoración



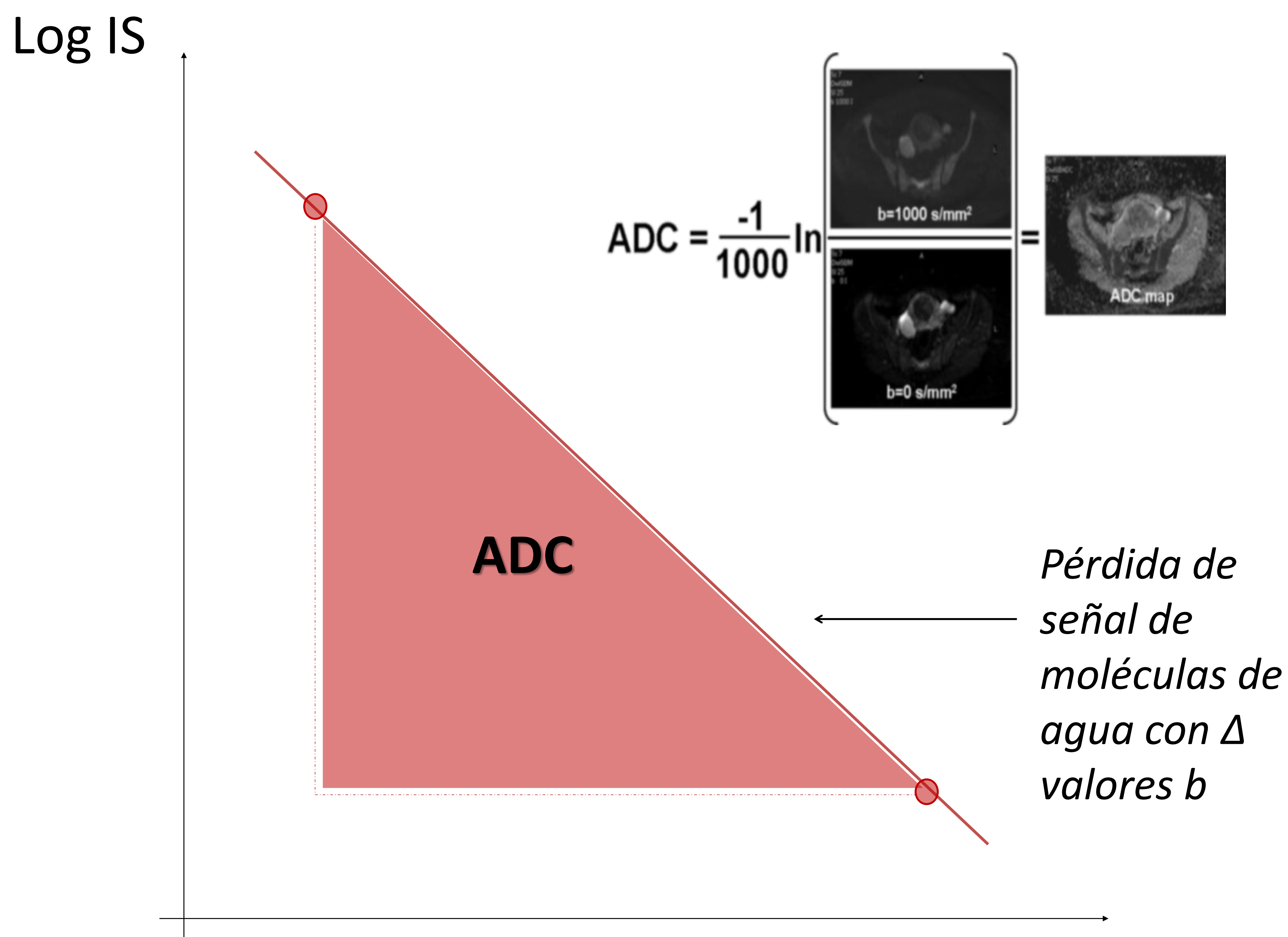
DCE-MR



4 RM torácica y 3D printing

Difusión por RM: Fundamentos y aplicaciones clínicas

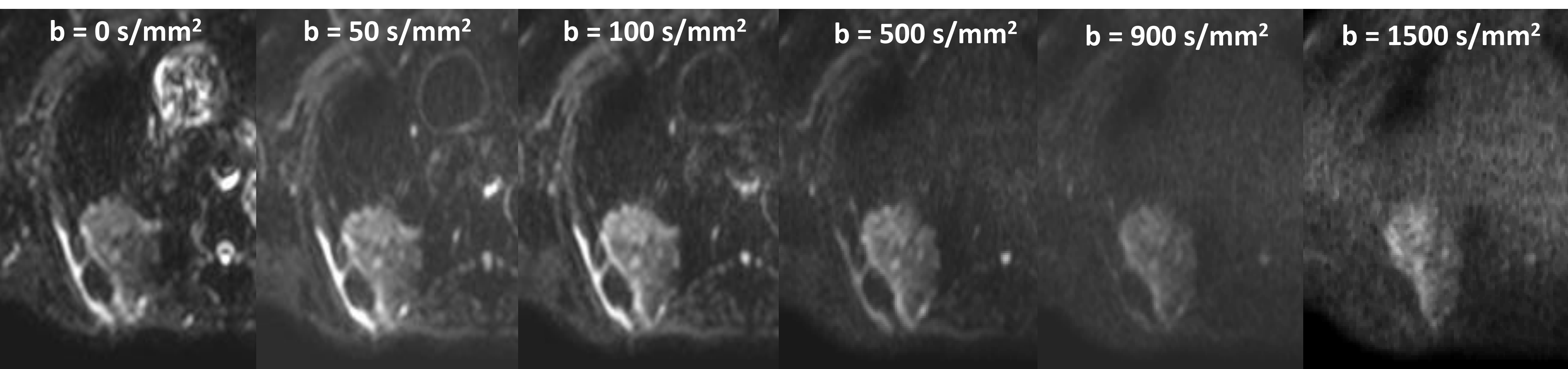
Modelo monoexponencial



DWI evalúa el movimiento browniano de las moléculas de agua en los tejidos (a 37° C) como reflejo de la arquitectura tisular.

high b value	ADC map	Interpretation
White	Black	Hypercellular tumors. Rarely, liquid or viscous abscess or blood products
White	White	T2 shine – through liquefactive necrosis
Black	White	Fluid, necrosis, low cellularity lesions, well differentiated adenocarcinomas
Black	Black	Fibromuscular tissues, fat, susceptibility artifacts (T2 “black out” effect)
White	Grey	Mature fibrosis with lower water content

Modelo biexponencial

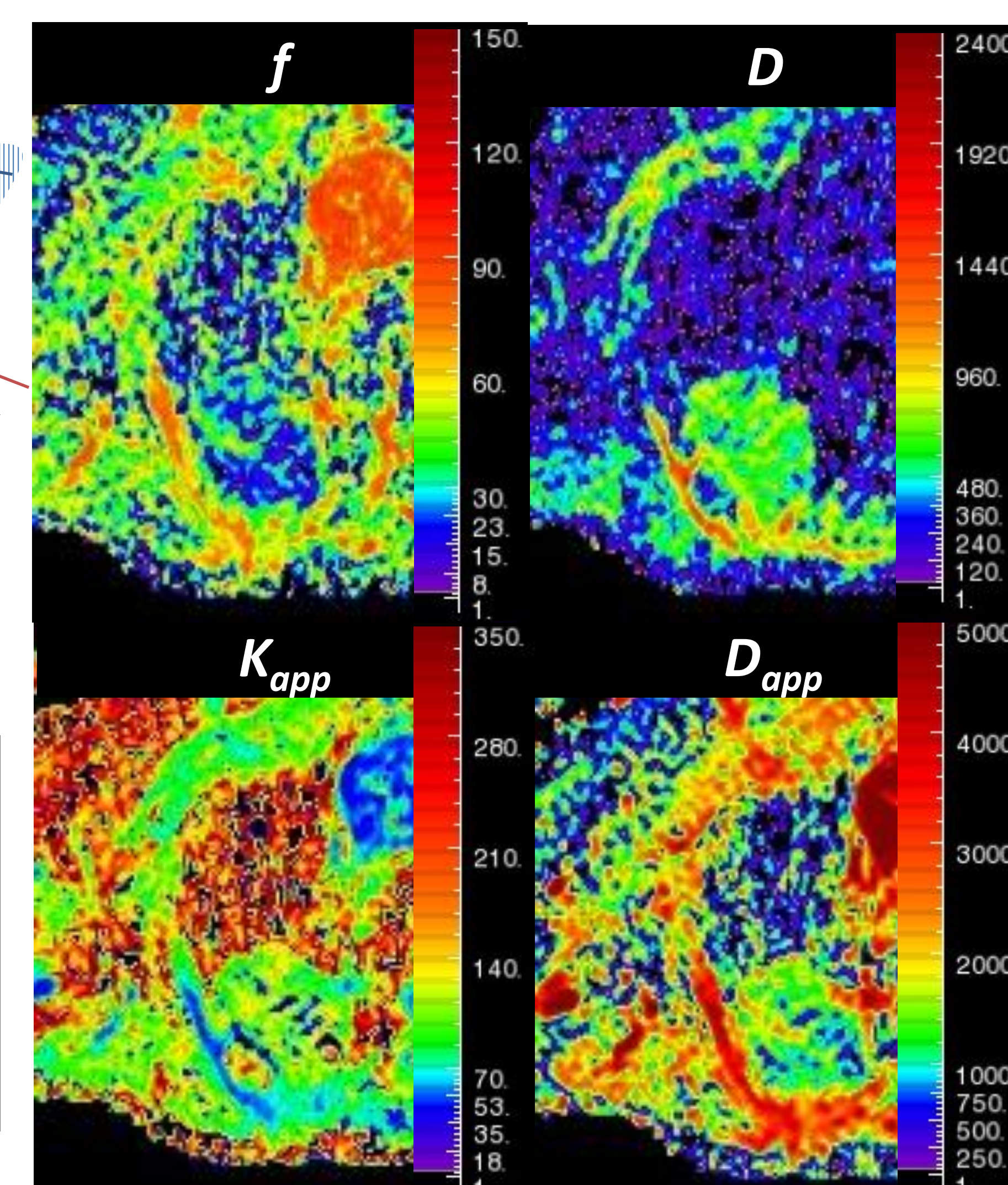
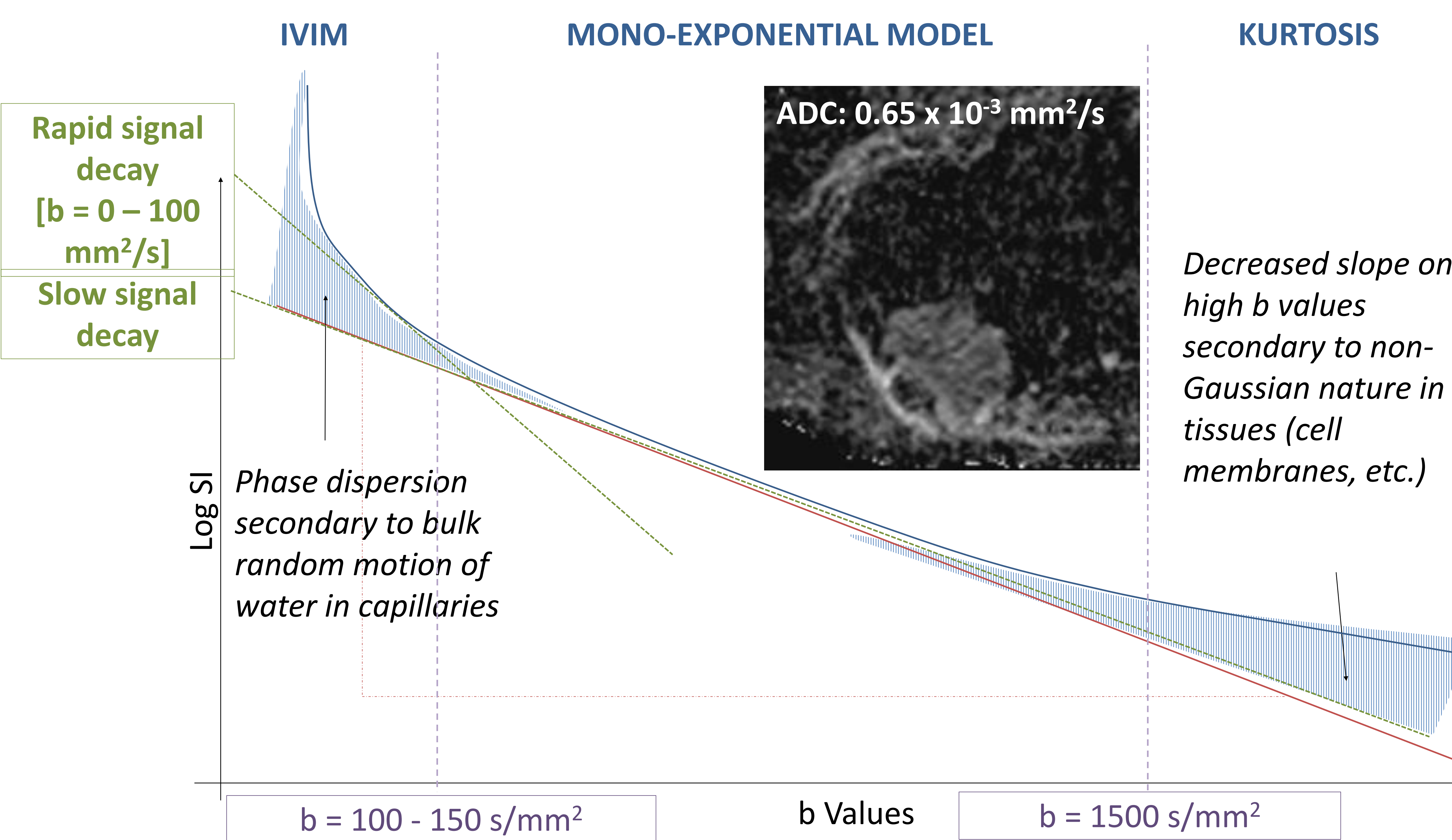


Parámetros IVIM

- D** Difusión real de las moléculas H₂O no influenciada por el movimiento de las moléculas de agua en los capilares.
- f** Contribución de la perfusión a la señal de difusión;: volumen fraccional de las moléculas de H₂O en los capilares
- D*** Contribución de la perfusión a la caída de la señal

Parámetros DKI

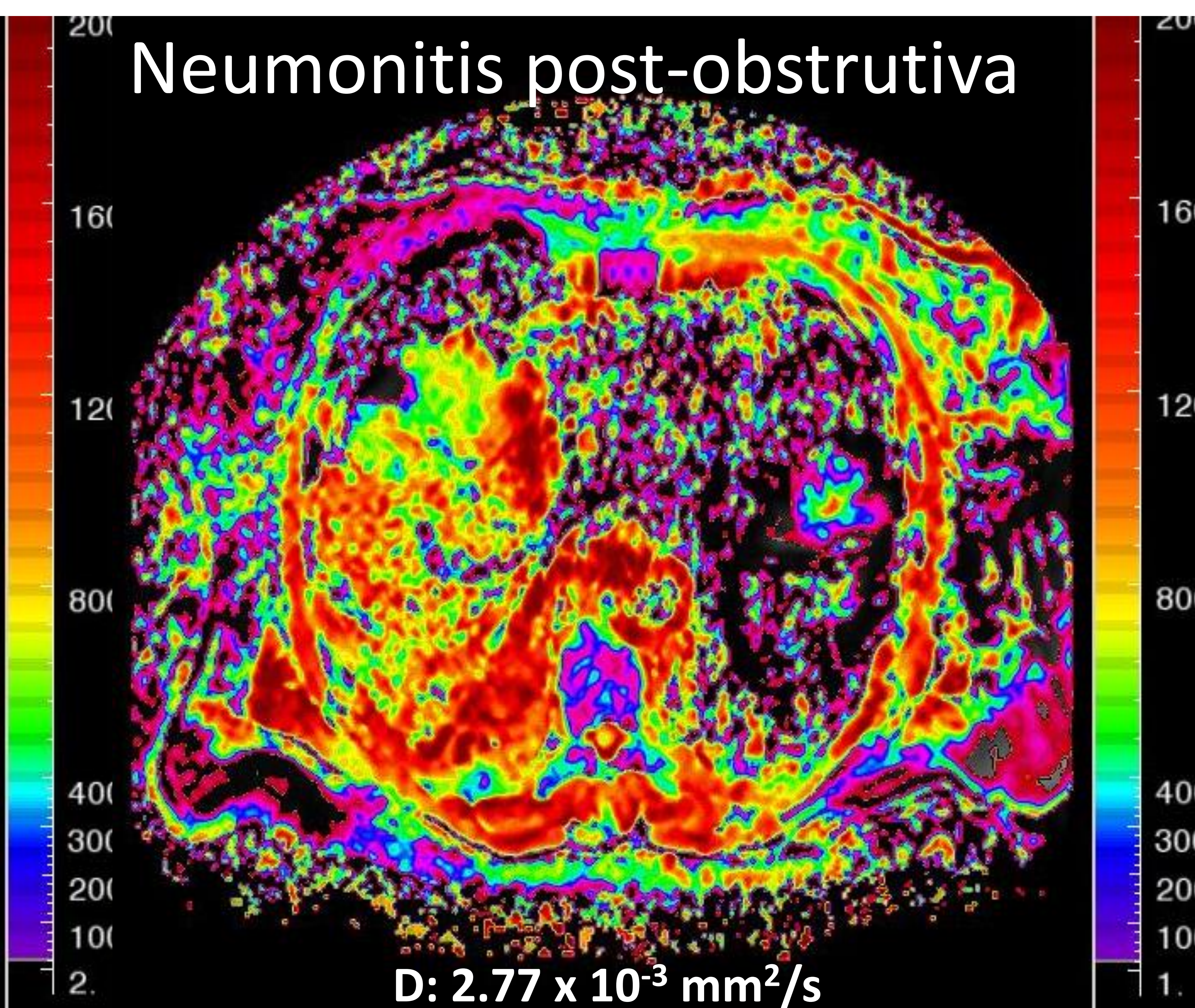
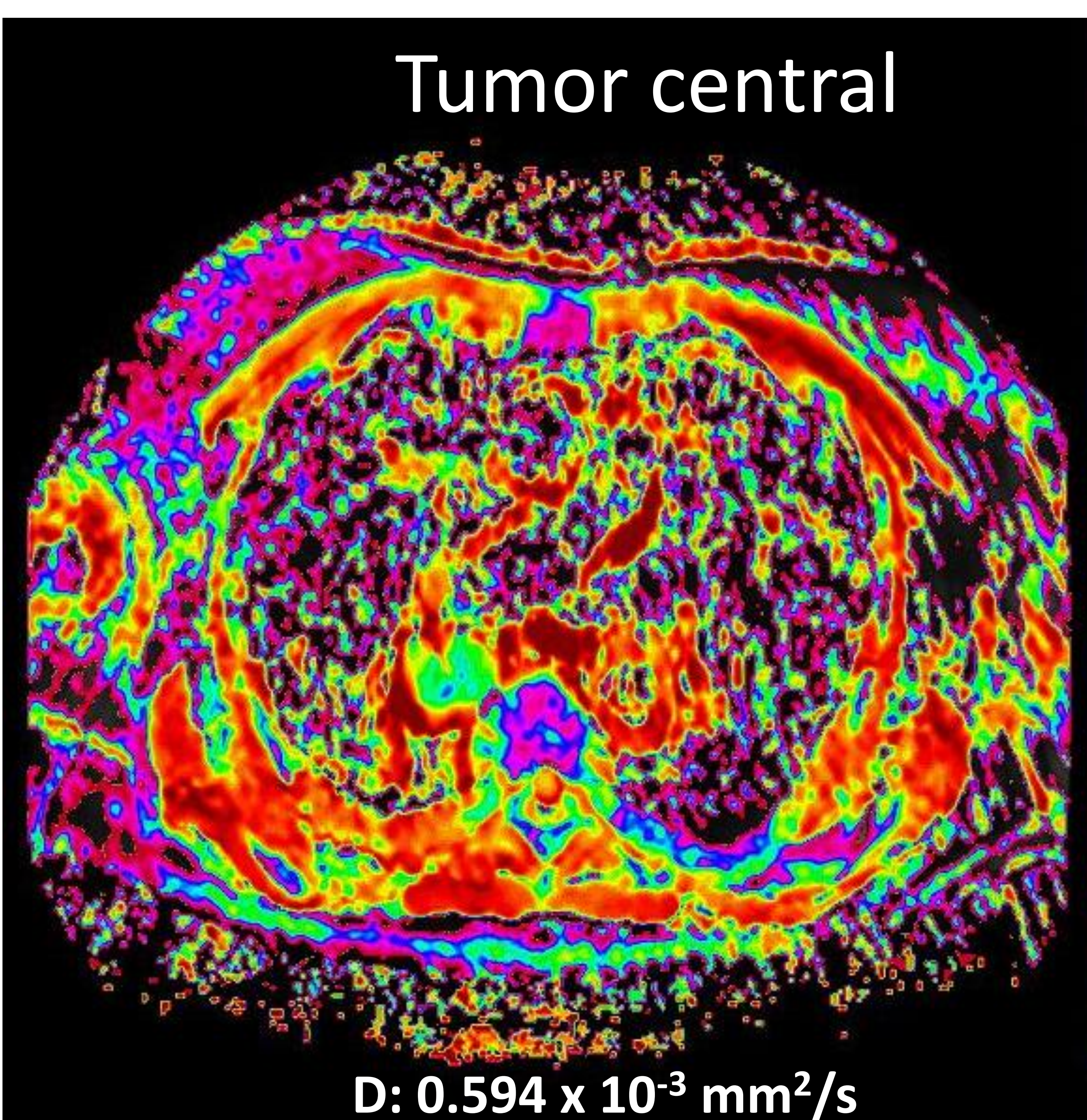
- D_{app}** Estimación del coeficiente de difusión paralelo a los gradientes de difusión.
- K_{app}** Desviación de la difusión real del patrón Gaussiano de caída de la señal de DWI



El modelo biexponencial ha mostrado mayor correspondencia con la difusión real de los tejidos, especialmente en órganos vascularizados (riñón, hígado, etc.).

4 RM torácica y 3D printing

Difusión por RM: Fundamentos y aplicaciones clínicas

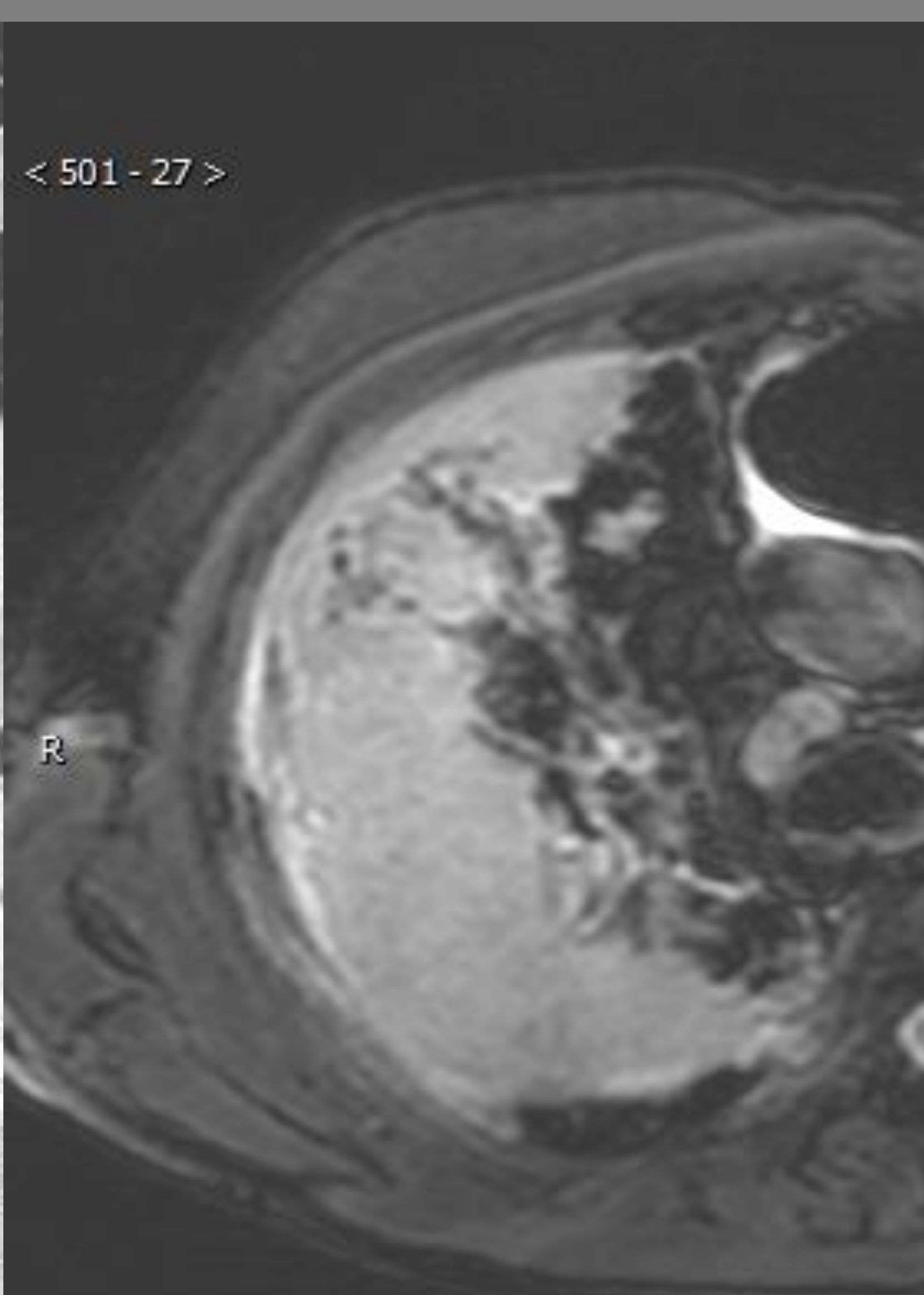


- La DWI es excelente en la diferenciación entre lesiones malignas (restrictivas) y benignas.
- Permite diferenciar el tumor central respecto a la neumonitis post-obstrutiva (importancia en tto radioterápico)

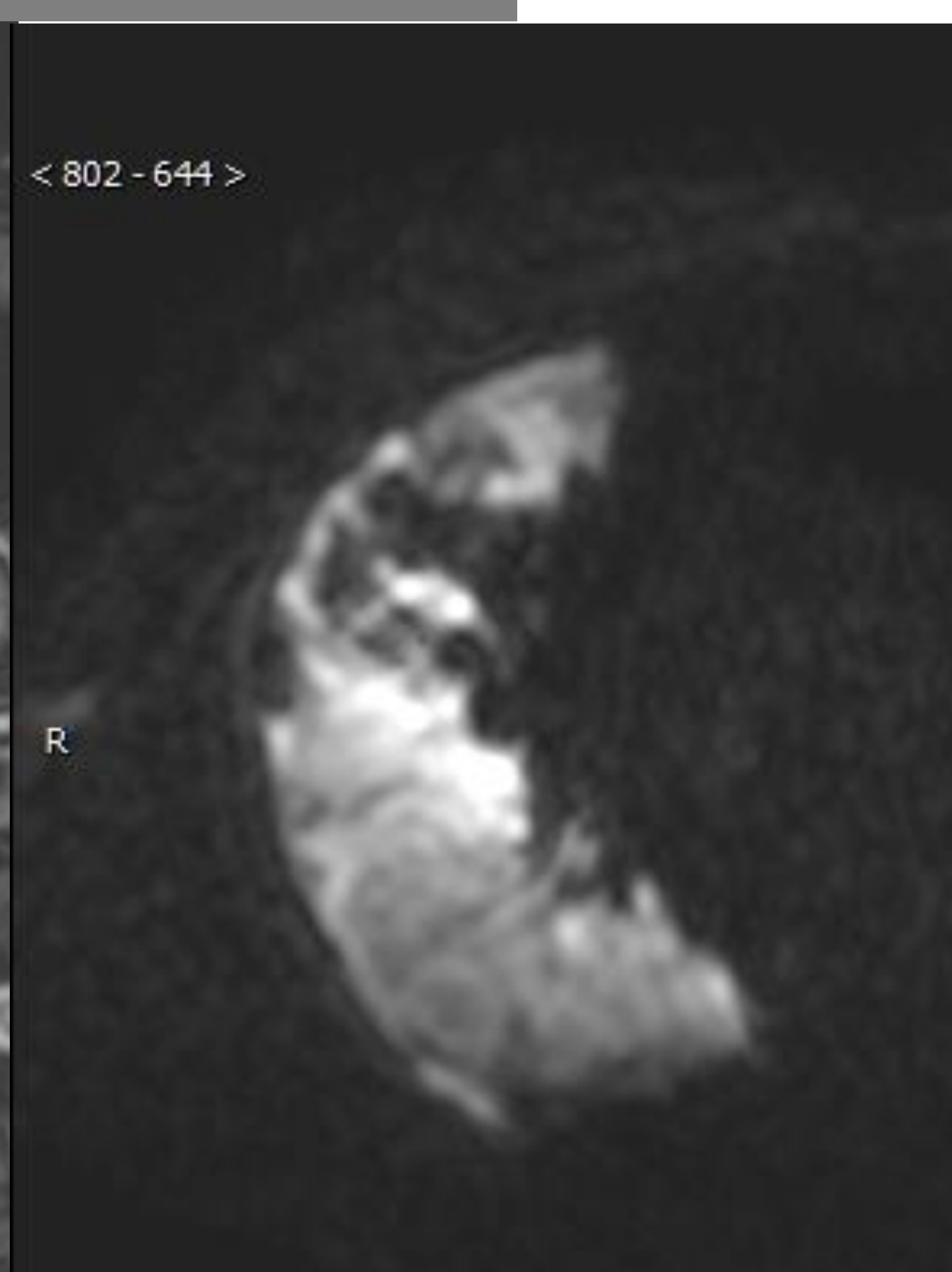
Paciente con **adenocarcinoma de pulmón central T3N2M0**, restrictivo (D: $0,594 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$) y neumonitis post-obstrutiva periférica, no restrictiva (D: $2,77 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)



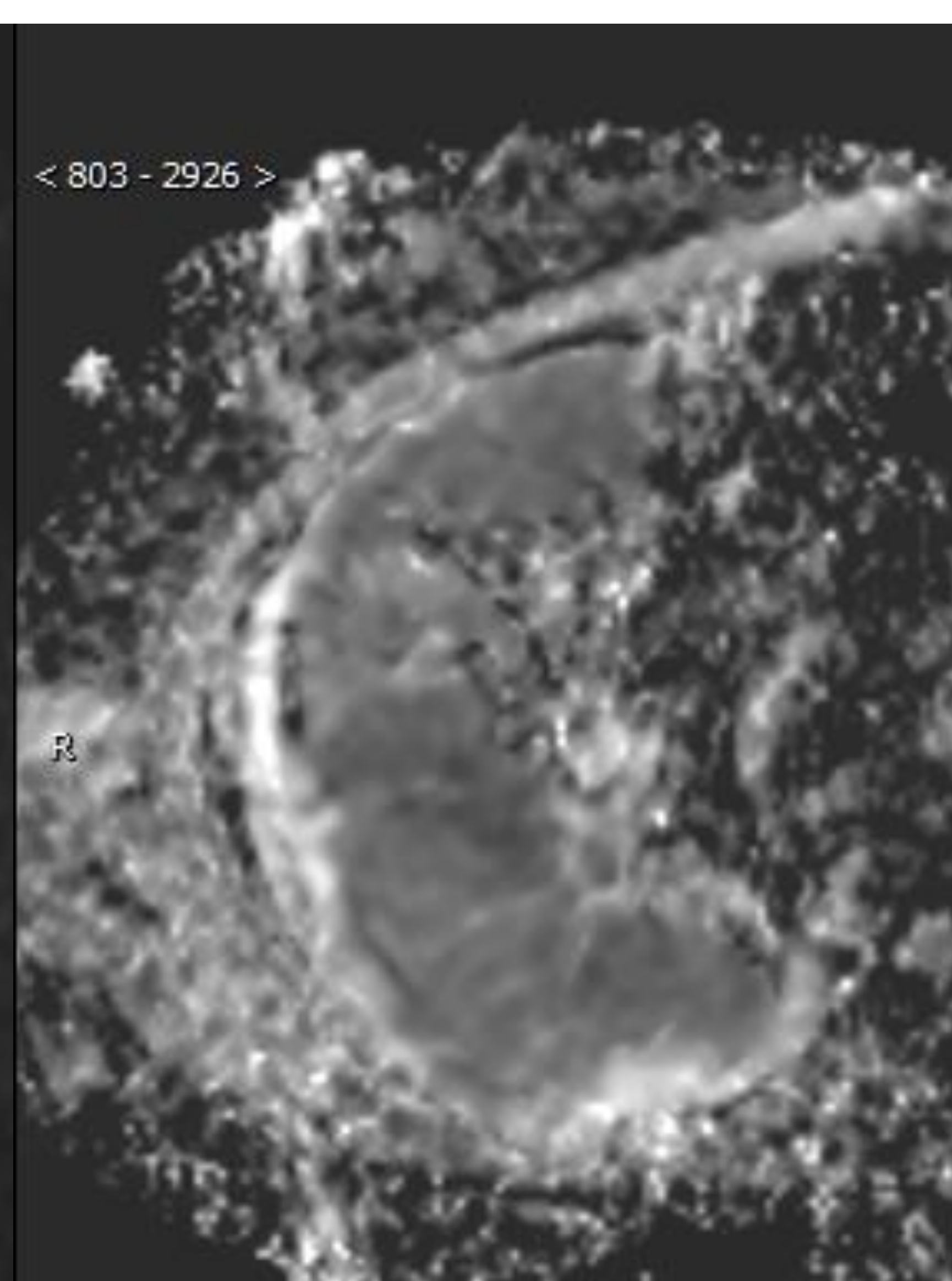
TAC



STIR



b = 1000/mm²



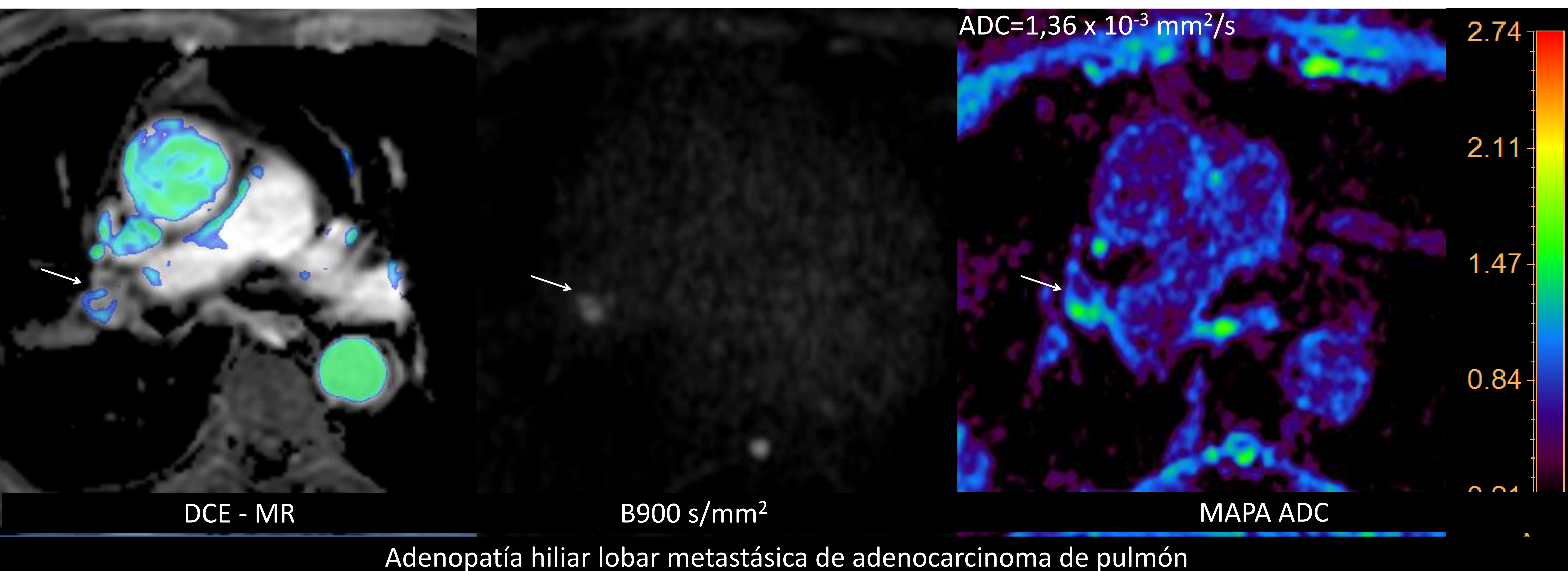
Mapa ADC

Paciente con consolidación periférica, lobar con menor broncograma aéreo del esperable. Síndrome constitucional. RM torácica muestra una consolidación con comportamiento restrictivo. **Adenocarcinoma mucinoso.**

- Gran utilidad en la diferenciación de consolidaciones pulmonares
- Excelente en la evaluación de invasión locorregional, agresividad tumoral y monitorización de respuesta

4 RM torácica y 3D printing

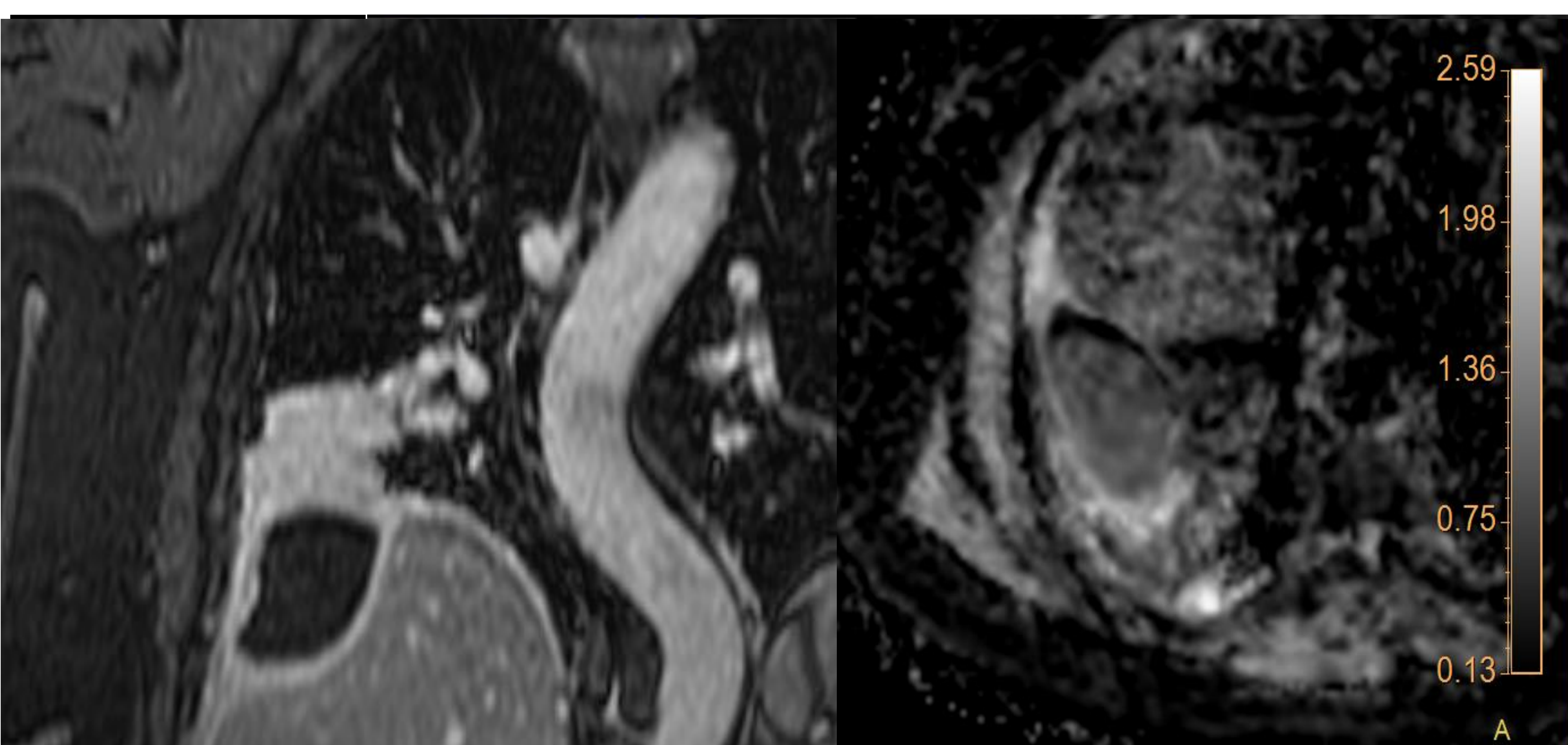
Difusión por RM: Fundamentos y aplicaciones clínicas



Adenopatía hiliar lobar metastásica de adenocarcinoma de pulmón

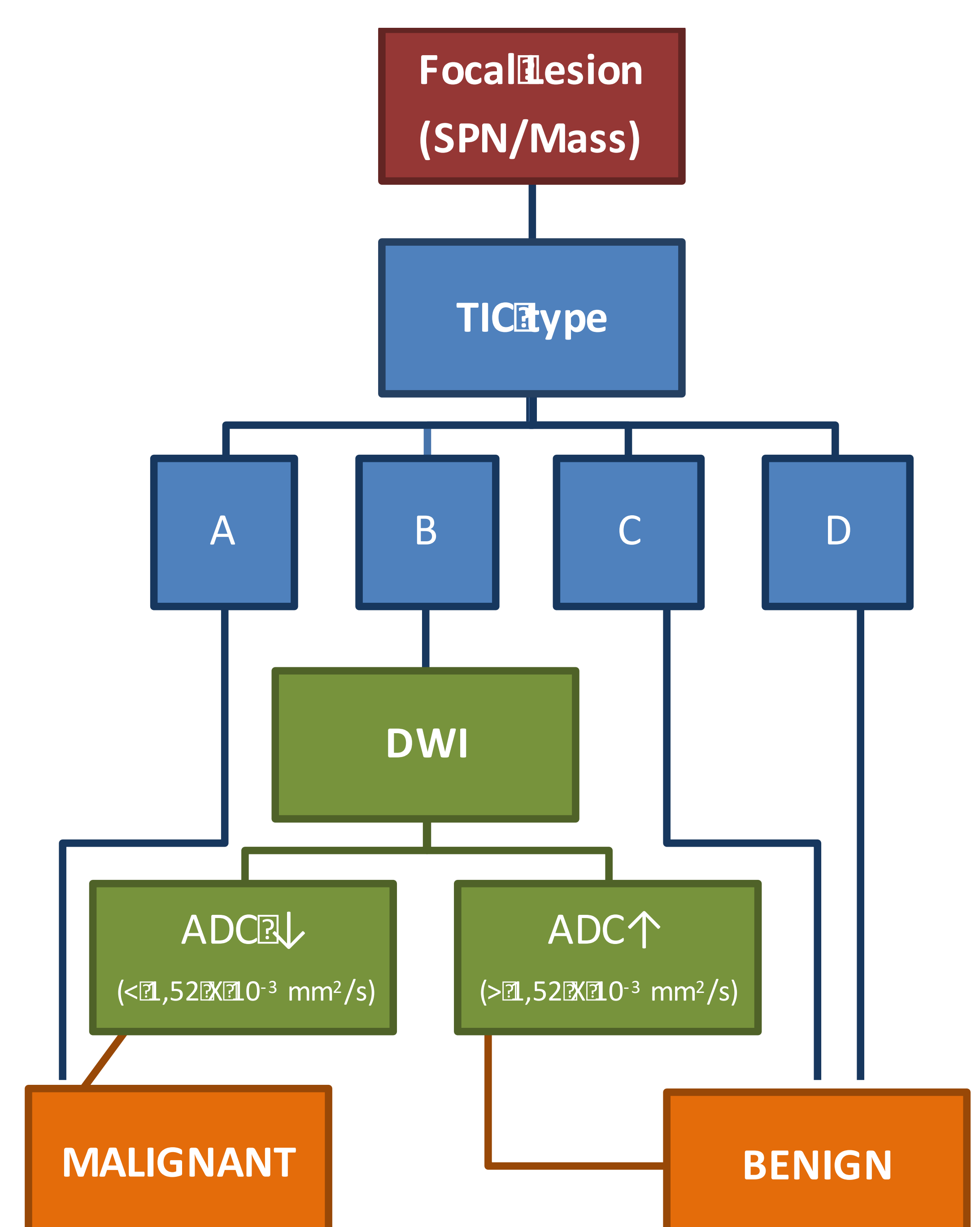
Technical parameters of DWI on 1.5 Tesla and 3 Tesla MRI scans.

	DWI 1.5 Tesla	DWI 3 Tesla
FoV	375 x 375	240 x 240
Matrix	288 x 136	133 x 240
Voxel size (mm ³)	2.60 x 2.84 X 8	2.61 x 2.55 x 10
EPI /Turbo factor	57/57	45/67
TR/TE (ms)	2250/96	1000/43 ms
Flip Angle	90°	90°
Fat saturation (IR)	Selective (SPAIR)	Selective (SPAIR)
Parallel imaging	SENSE x2	SENSE x2
Number of repetitions	2	2
Bandwith (kHz)	14.330	17.158
Respiratory trigger	Navigation	Navigation
B values	0, 50, 100, 500, 1000 s/mm ²	0, 50, 100, 500, 1000 s/mm ²



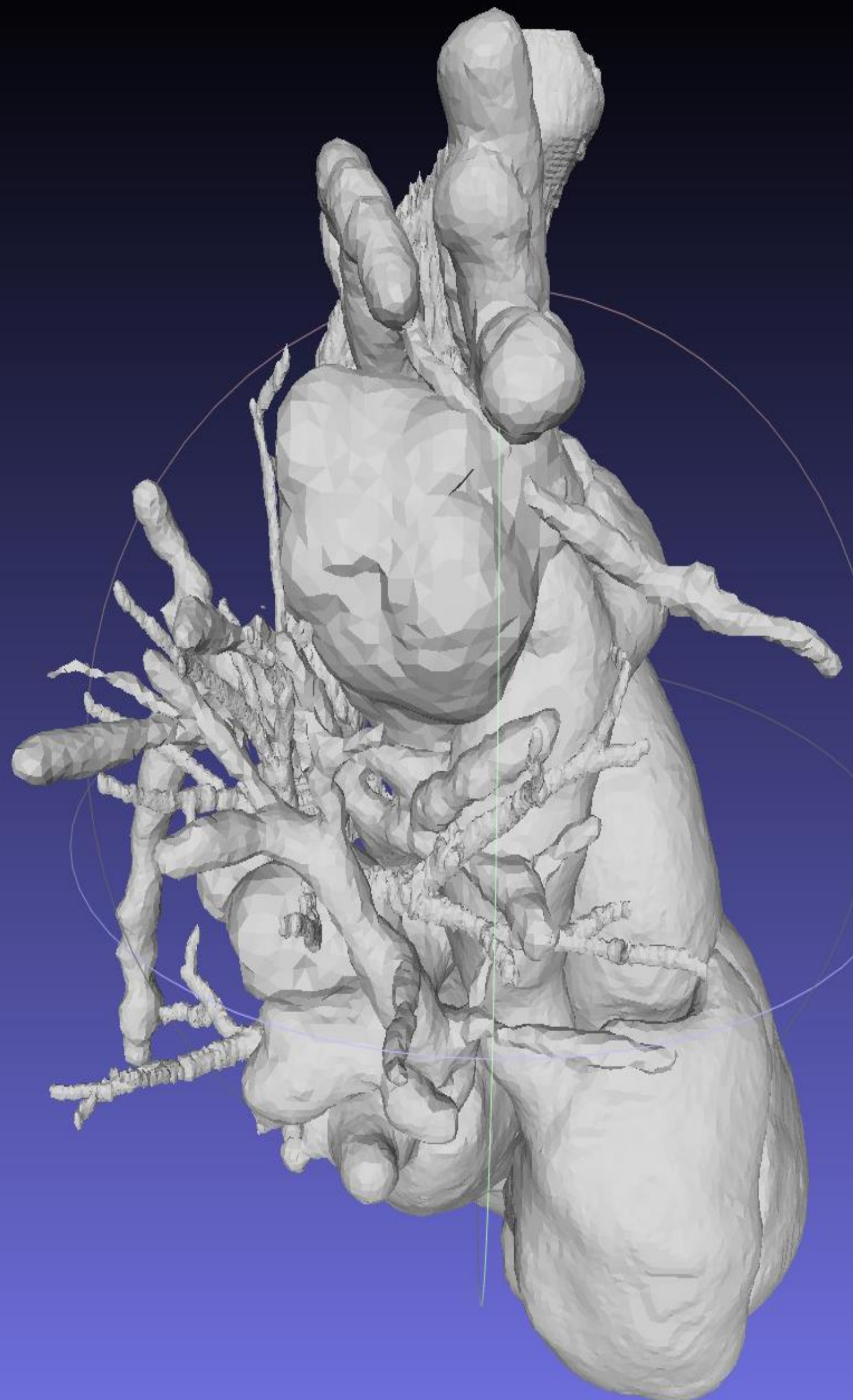
Paciente con lesión parenquimatosa pulmonar con curva tipo D (sugestiva de malignidad; pico de realce con meseta posterior). DWI muestra un comportamiento no restrictivo.

Neumonía bacteriana complicada con absceso diafragmático (restricción central en DWI; flecha blanca).

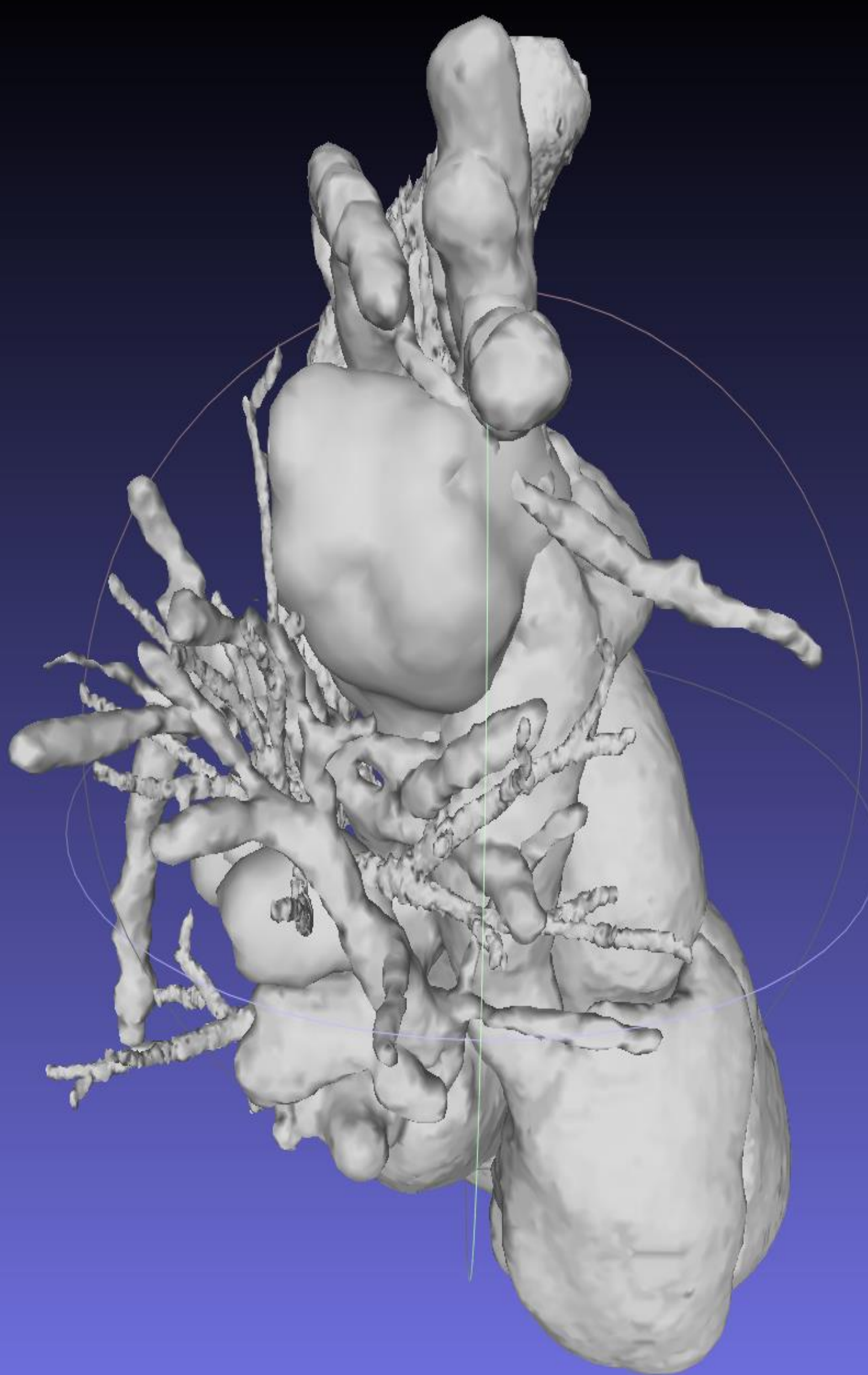


5 Post-proceso de STL

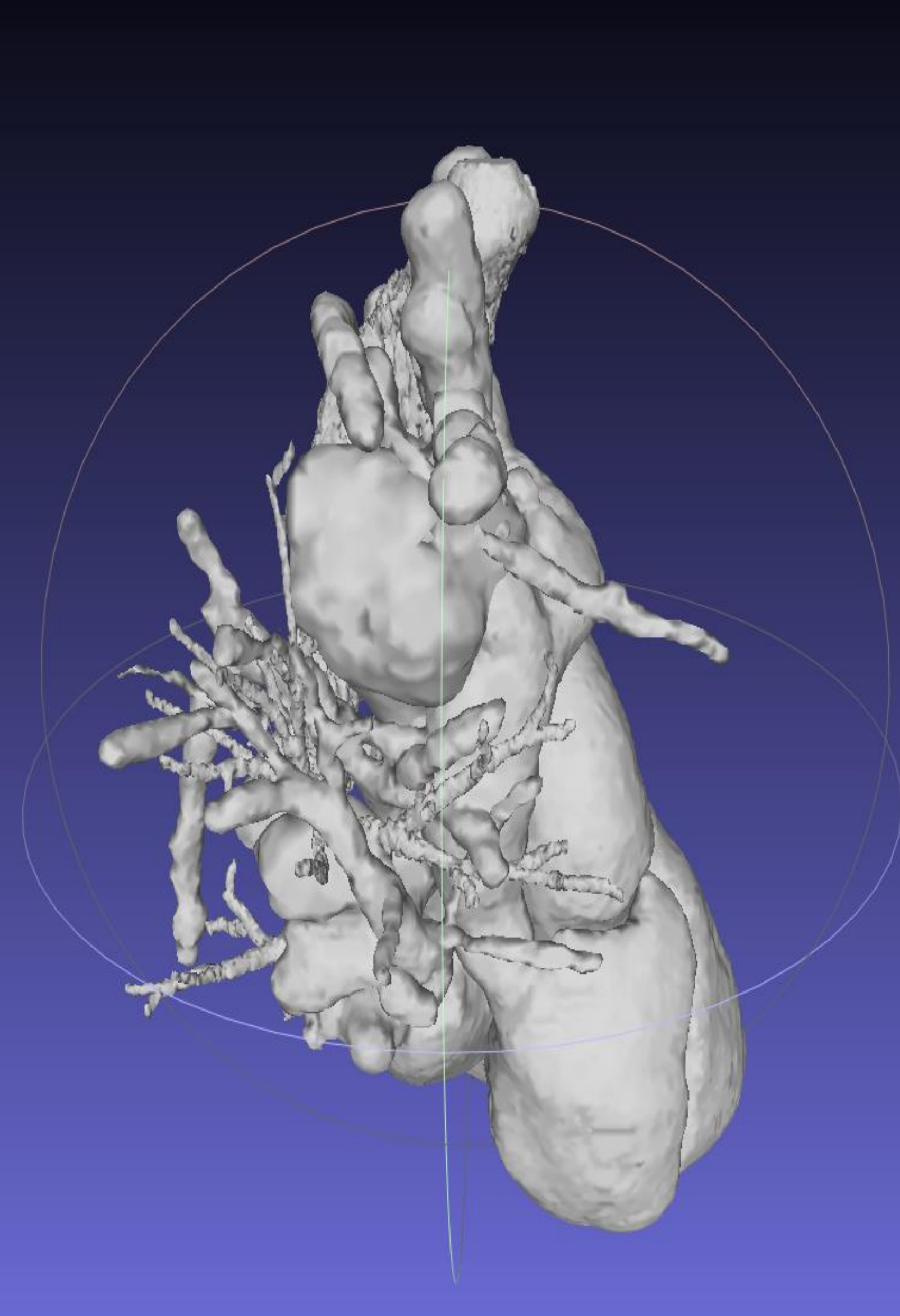
Filtros de suavizado y errores de segmentación



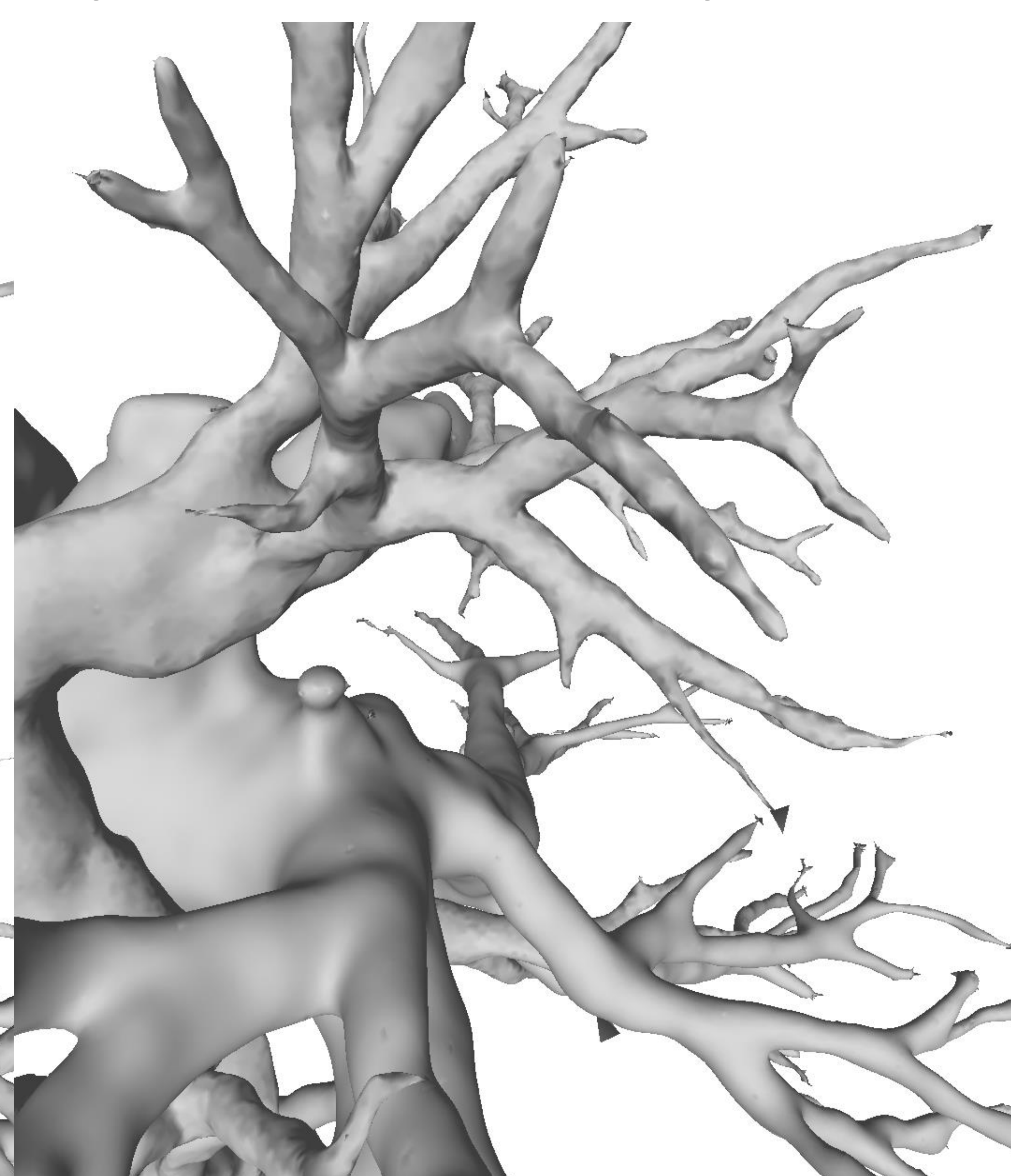
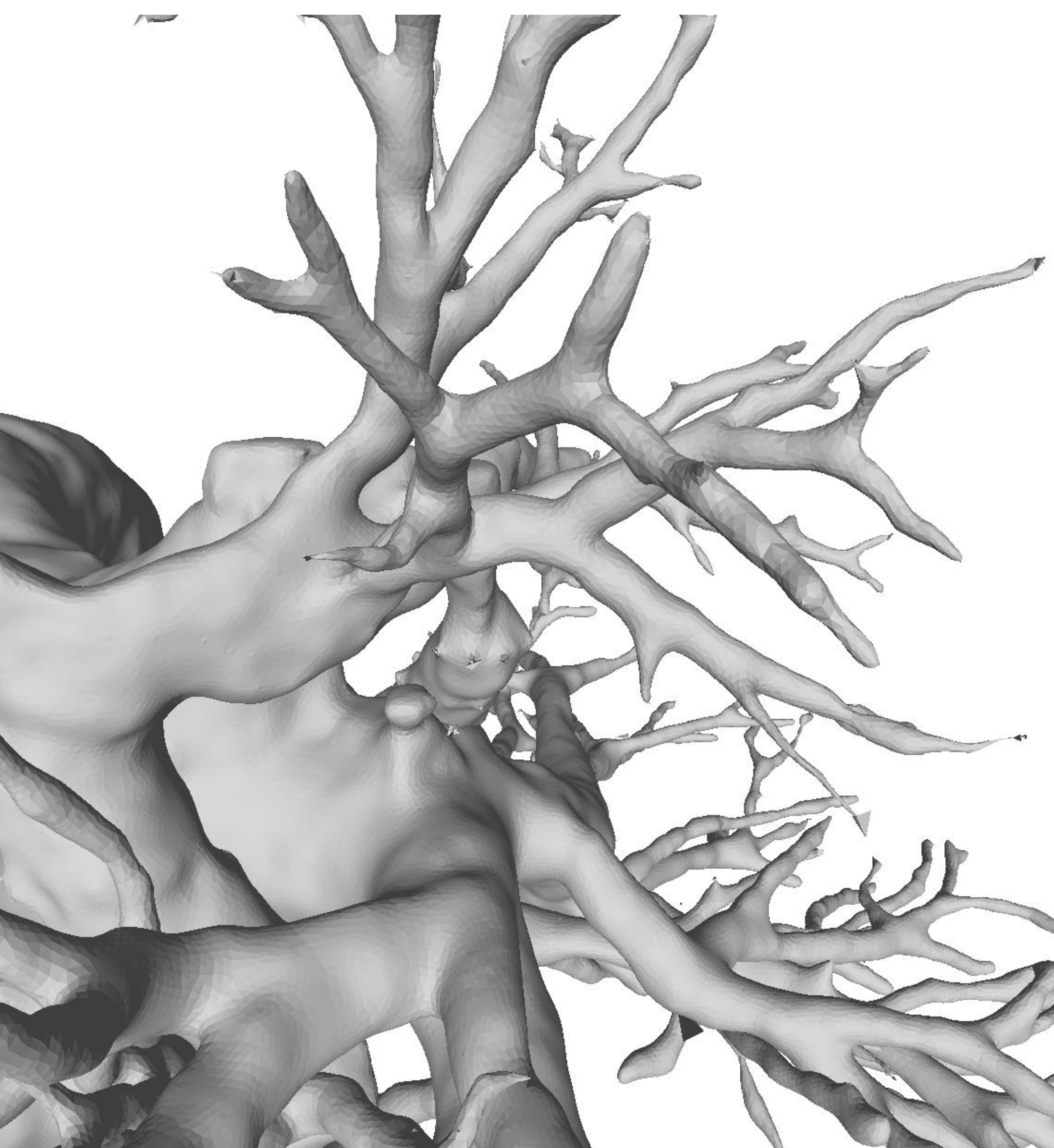
STL 3D sin filtrado



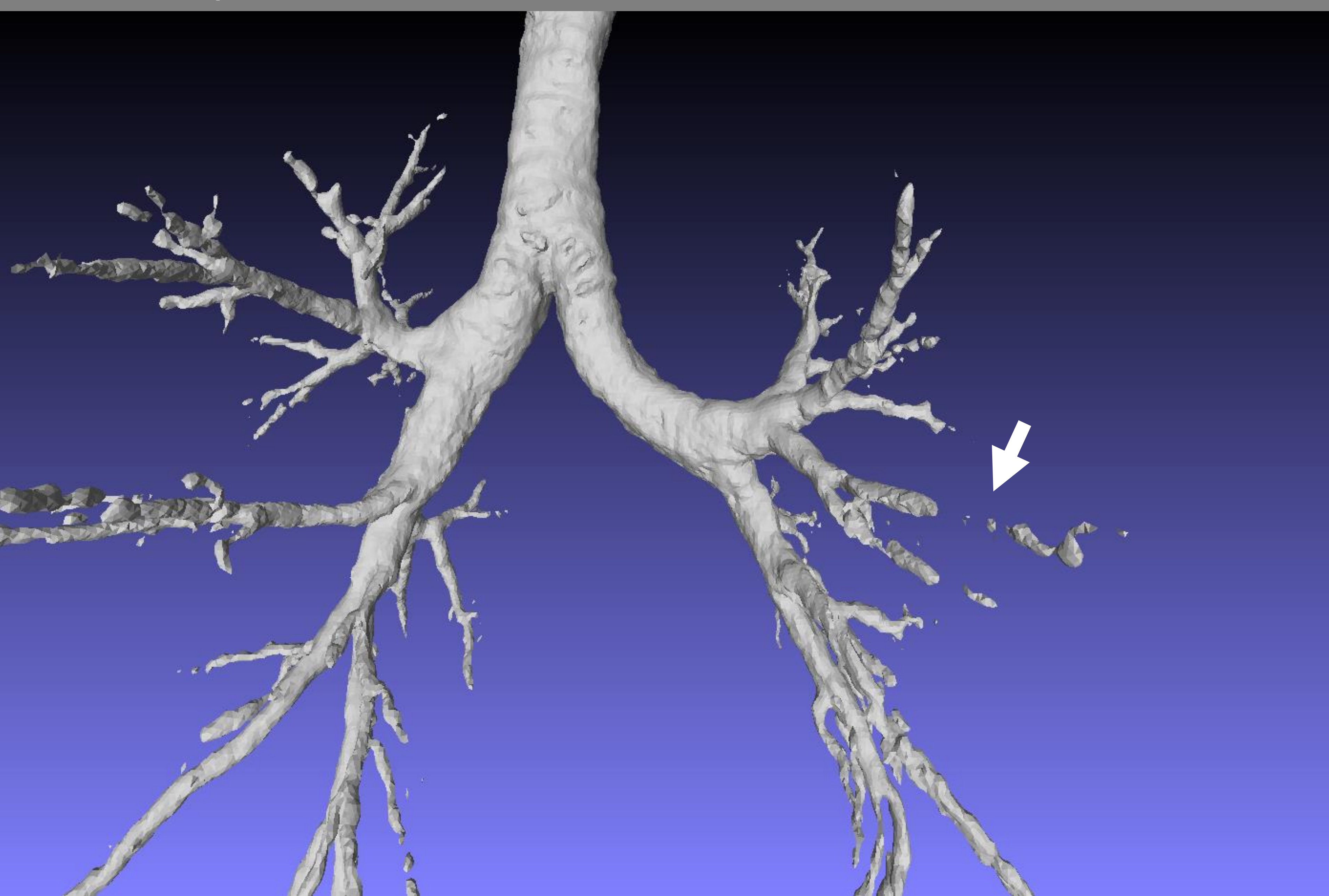
Filtrado Laplaciano con preservación de superficie



Filtrado Laplaciano sin preservación de superficie



Con métodos de filtrado laplaciano sin pérdida conseguimos suavizar la malla. Cuando se utilizan algoritmos de filtrado con pérdida, el suavizado de la malla es mayor a costa de una pérdida de información en las ramas broncovasculares periféricas más pequeñas.



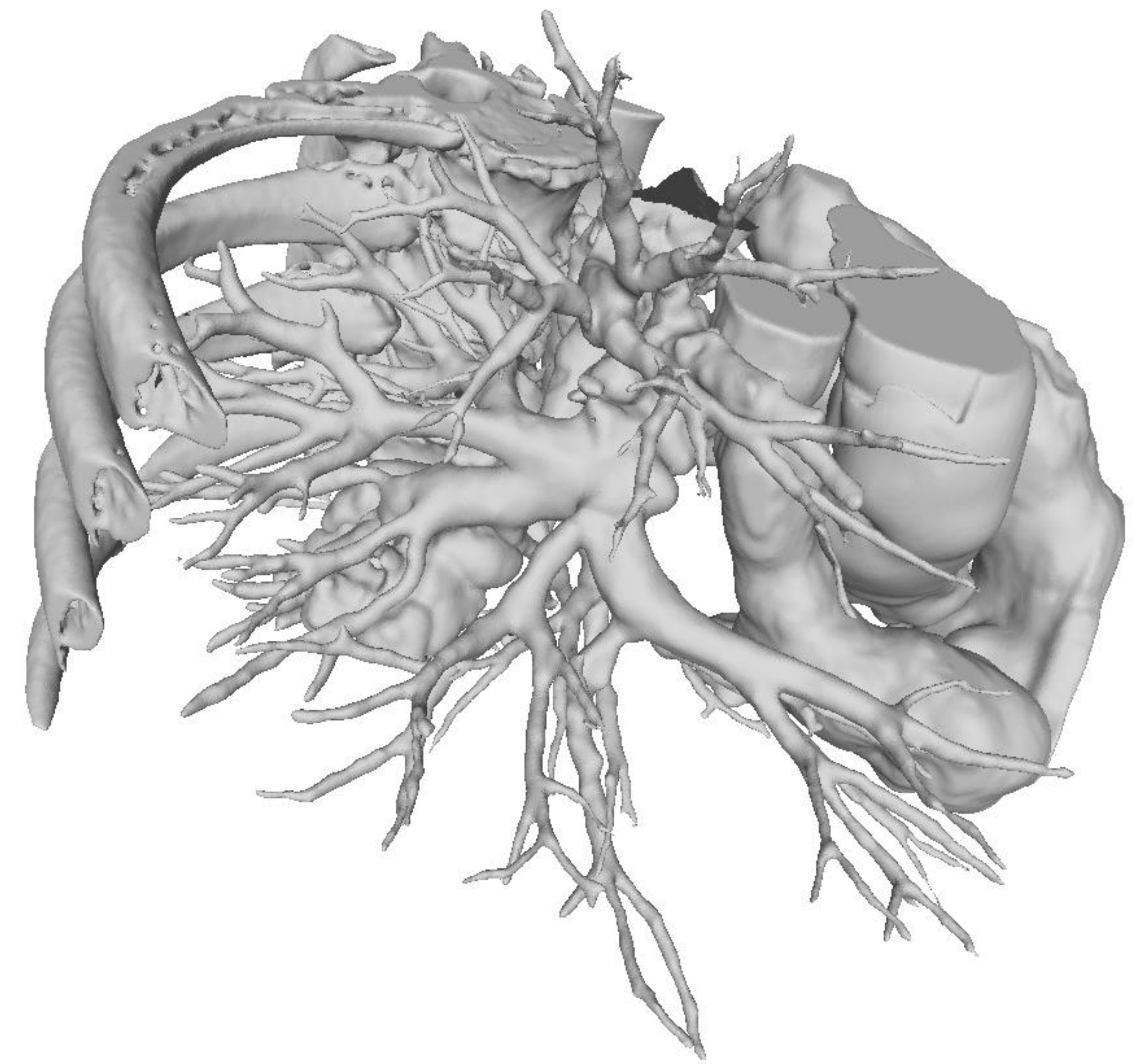
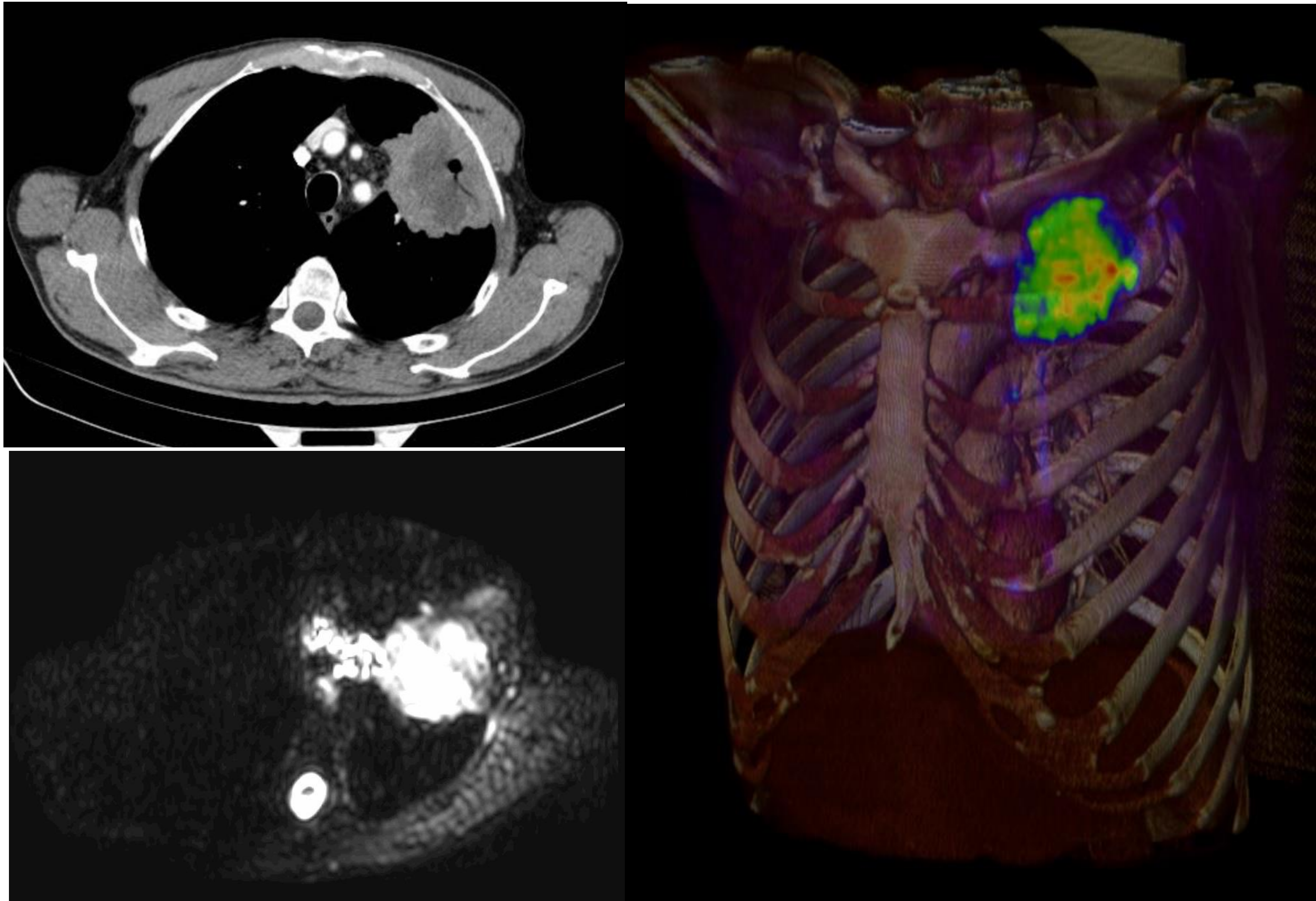
Errores en la generación:

1. **Holes:** espacios entre triángulos de la malla
2. **Normales invertidas:** define lo que está dentro de lo que está fuera del volumen a imprimir (flecha blanca).

Durante la generación del STL se pueden producir errores de conversión por imperfecciones en la segmentación (falta de cierre de la malla):

6 Impacto 3D printing híbrido en cáncer de pulmón

Materiales y método



1. Adquisición

Adquisición de TC y RM en dos días consecutivos utilizando protocolos de adquisición de TC con contraste y DWI torácica expuestos anteriormente.

2. Segmentación

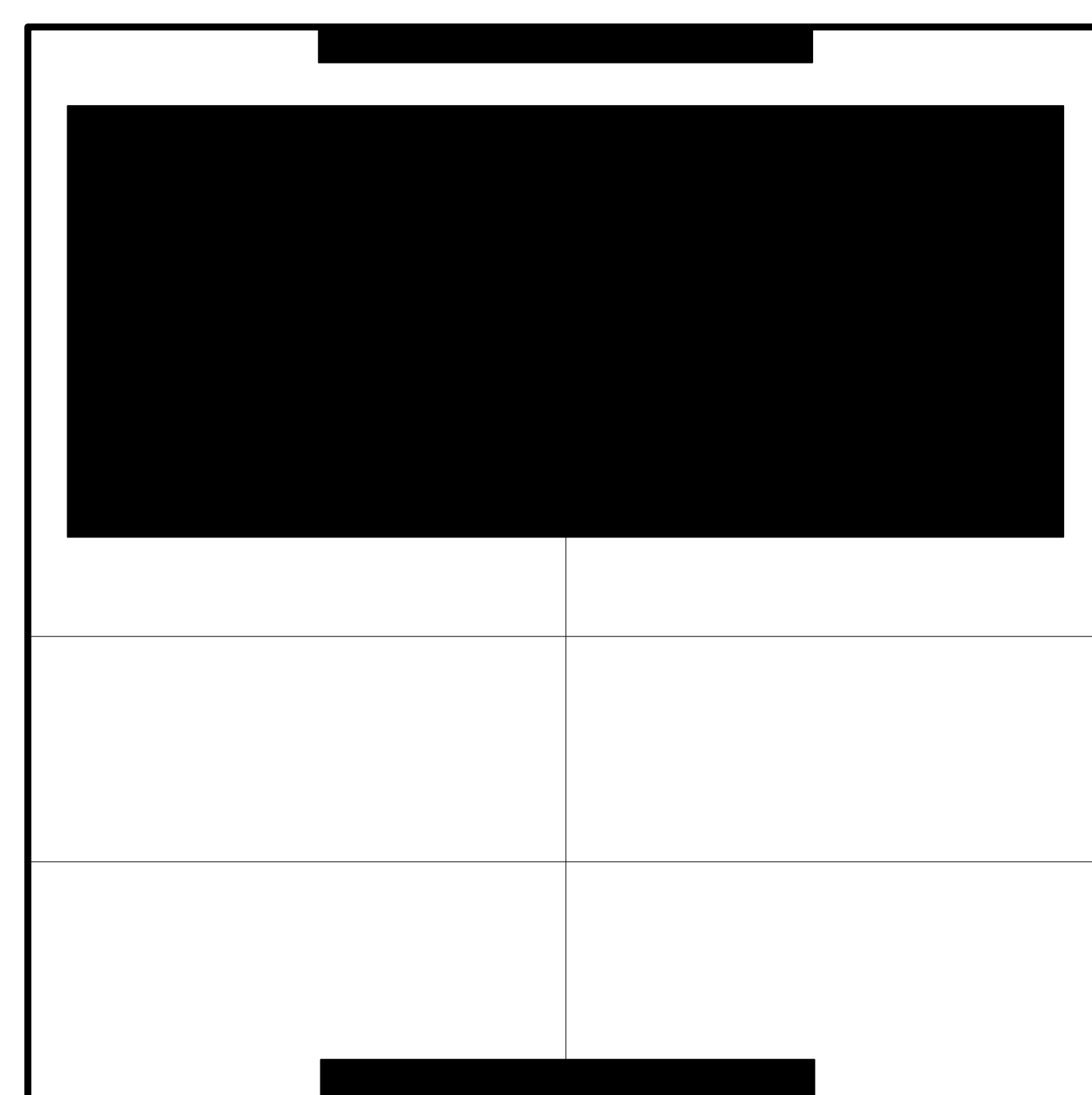
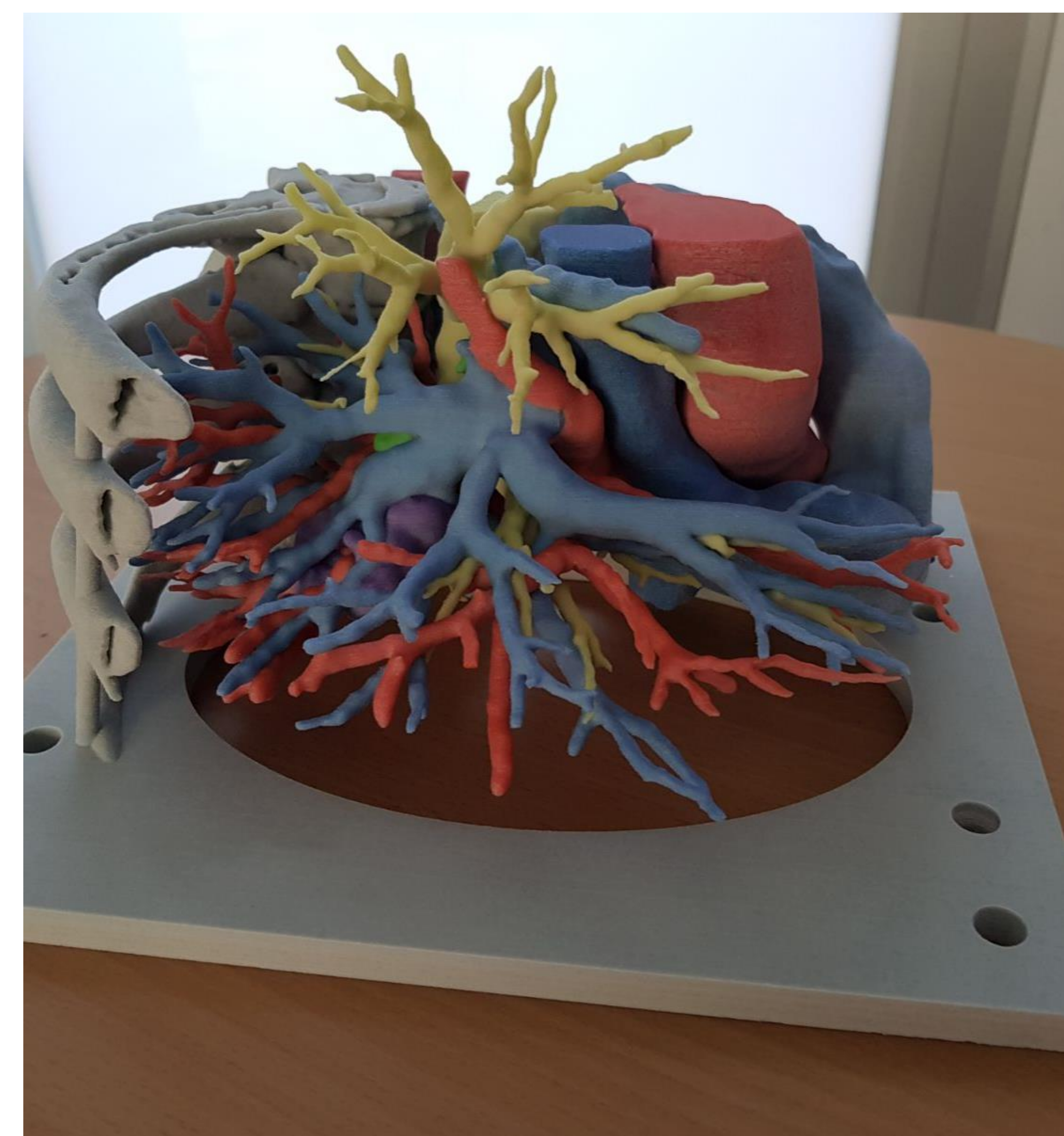
Fusión de TC y gradiente b alto de DWI utilizando modelos de registro rígidos con corrección manual.

Software de segmentación semiautomática y por umbral de densidades.

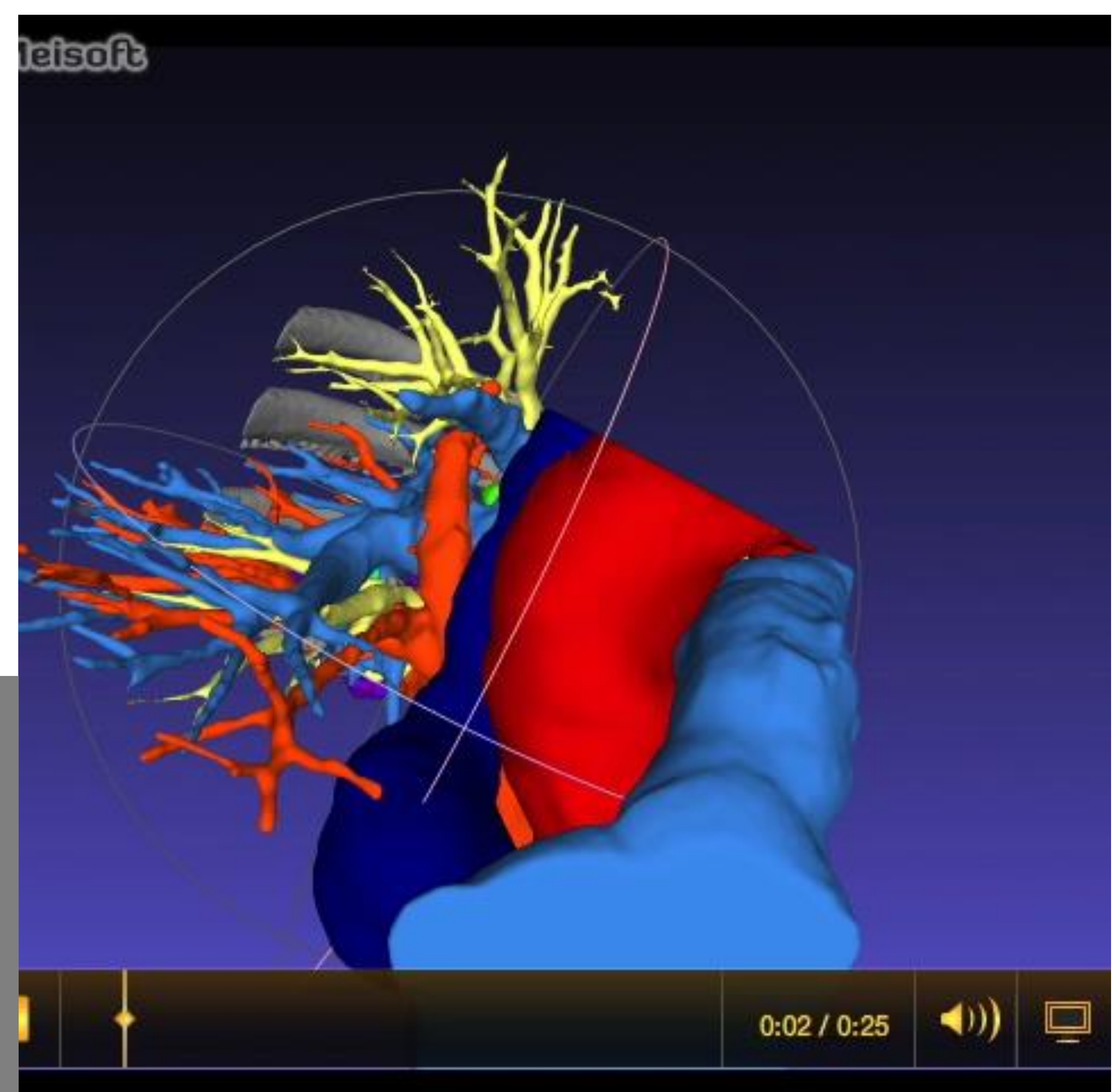
3. Generación STL

Lectura del caso y selección del volumen de impresión acorde a las necesidades del enfermo del cirujano.

Evaluación de las mallas obtenidas previas al post-proceso.



Binder Jetting
ProJet 660 pro
(3D systems)



6. Preparación del modelo 3D

Limpieza del modelo e infiltración con productos acrílicos elastoméricos para incrementar su dureza. Embalado y transporte.

5. Impresión 3D

Obtención de modelos monomaterial con composite y policromáticos.

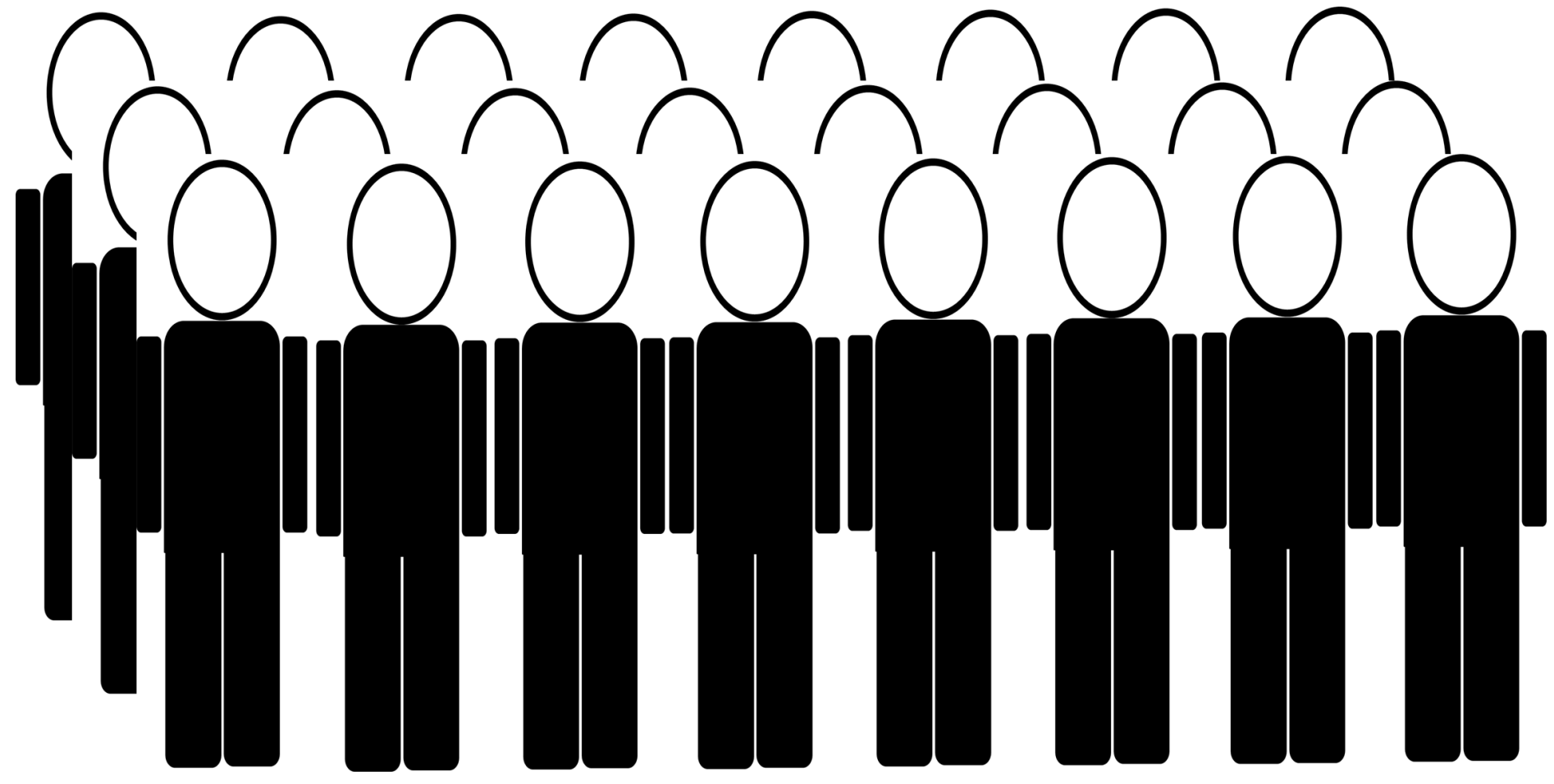
4. Optimización STL

Suavizado de malla con modelos Laplacianos sin pérdida.

Adquisición de color acorde a escala cromática previamente consensuada con el cirujano torácico

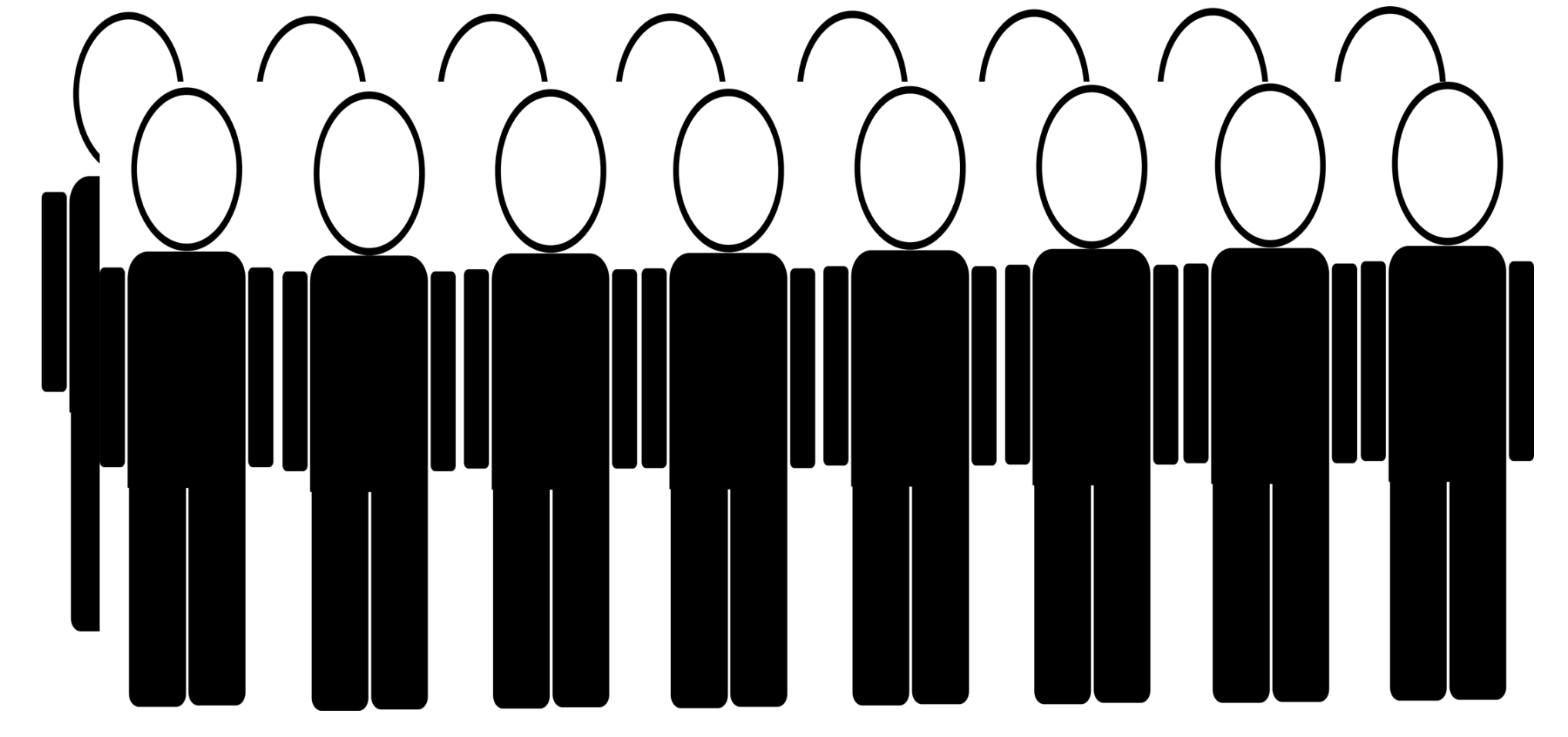
6 Impacto 3D printing híbrido en cáncer de pulmón

Resultados



Grupo no 3D printing

Valoración prequirúrgica con TC y PET/TAC.

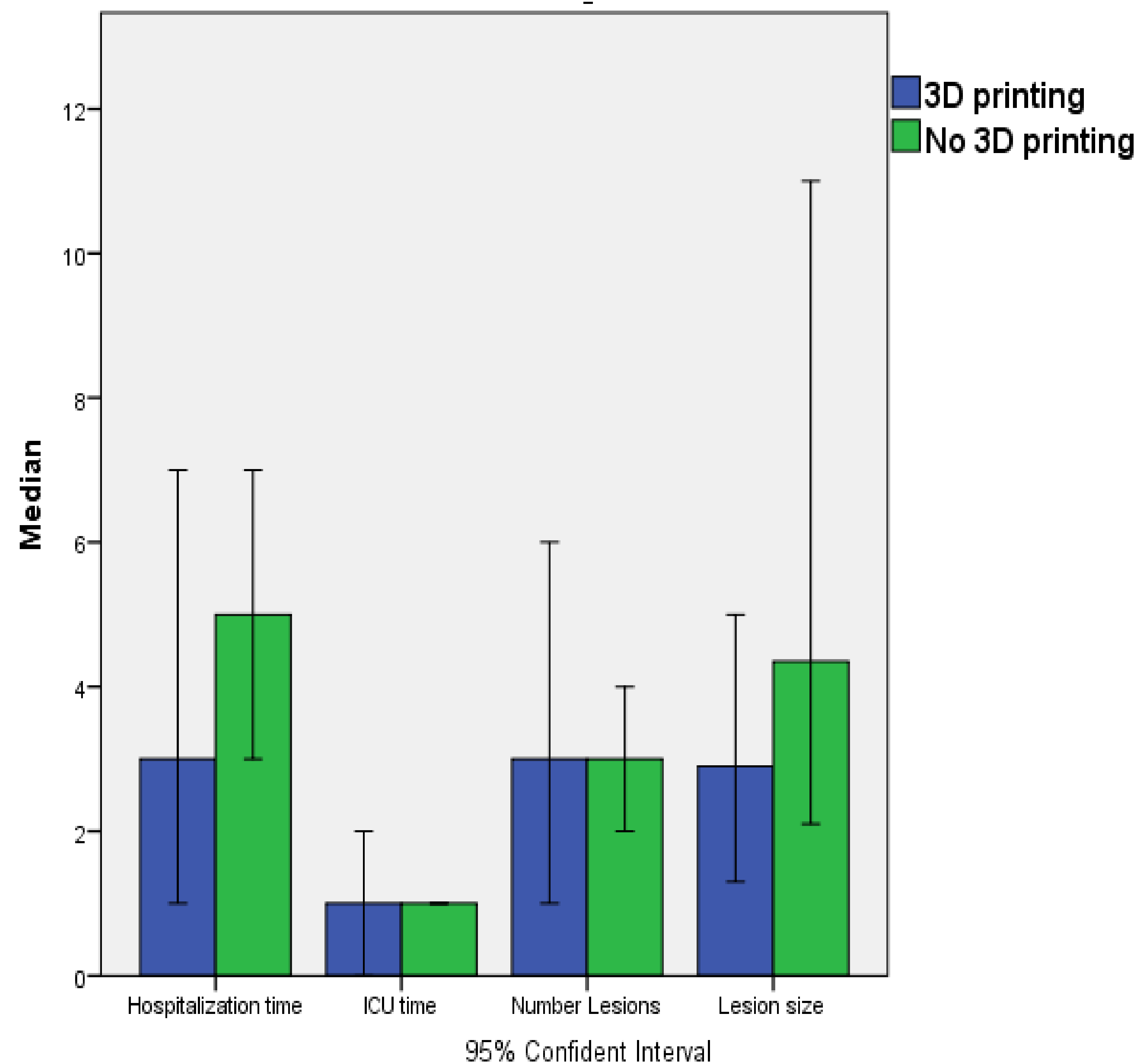
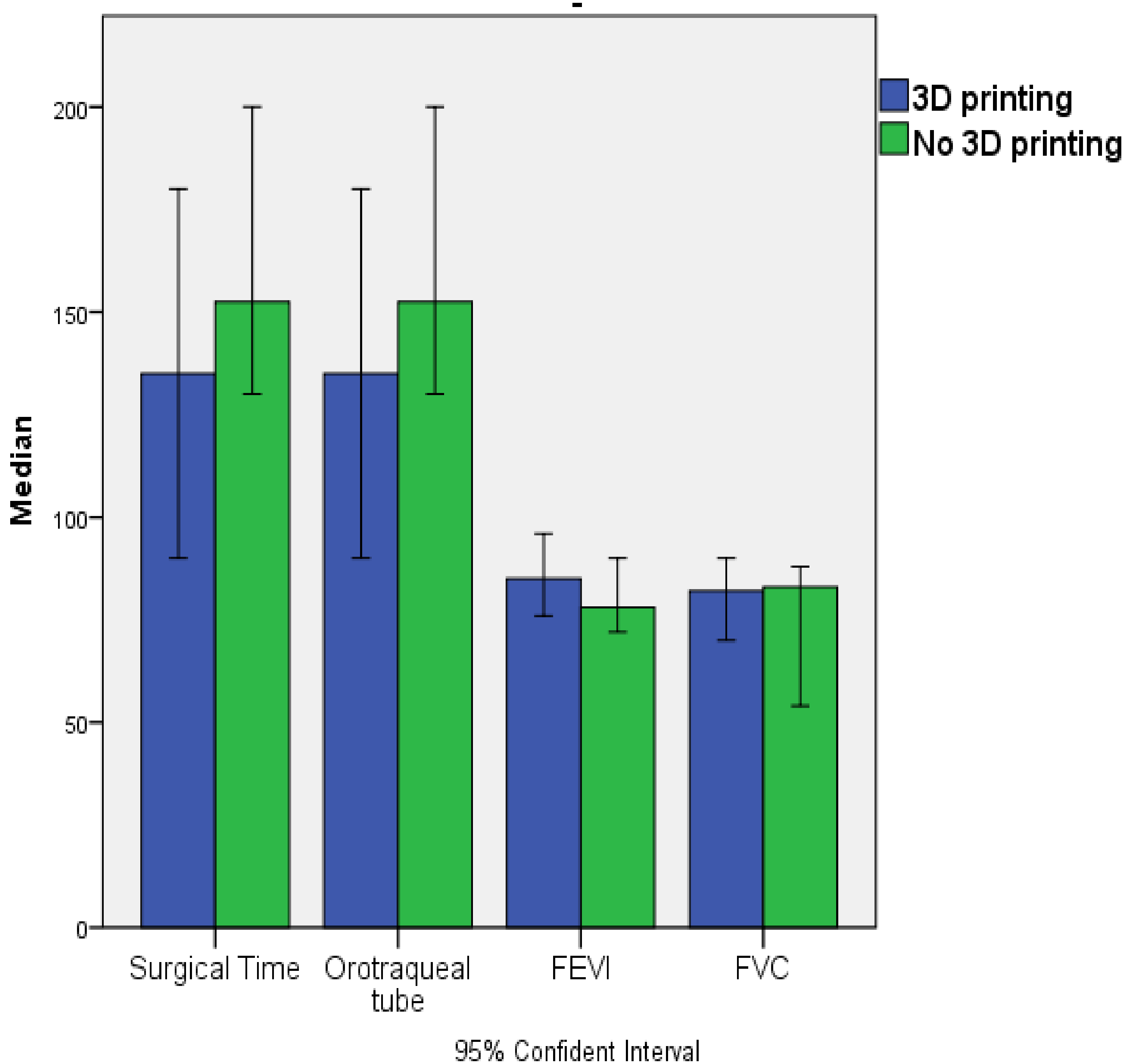


Grupo 3D printing

Valoración prequirúrgica con TC, RM y modelado 3D

No diferencias significativas ($p > 0,05$) en edad, genero, estadiaje tumoral, ECOG, complicaciones en primer mes y a los 3 meses

	Grupo 3D printing	Grupo no 3D printing	Valor p
Tiempo quirúrgico	117,5 ± 47,7 minutos	165,6 ± 31,5 minutos	0,031
Intubación orotraqueal	119,38 ± 43,91 minutos	165,6 ± 31,5 minutos	0,027
FEVI	86,2 ± 8,78 l	78,6 ± 14,01 l	> 0,05
FVC	83 ± 8,5 l	78,83 ± 12,68 l	> 0,05
Tiempo hospitalización	4,88 ± 3,64 días	5,4 ± 1,57 días	> 0,05
Tiempo UCI	2,02 ± 3,28 días	1,1 ± 0,31 días	> 0,05
Número lesiones	2,75 ± 1,8	3 ± 1,15	> 0,05
Tamaño lesión	13,68 ± 17,7 cm	6,1 ± 4,6 cm	> 0,05

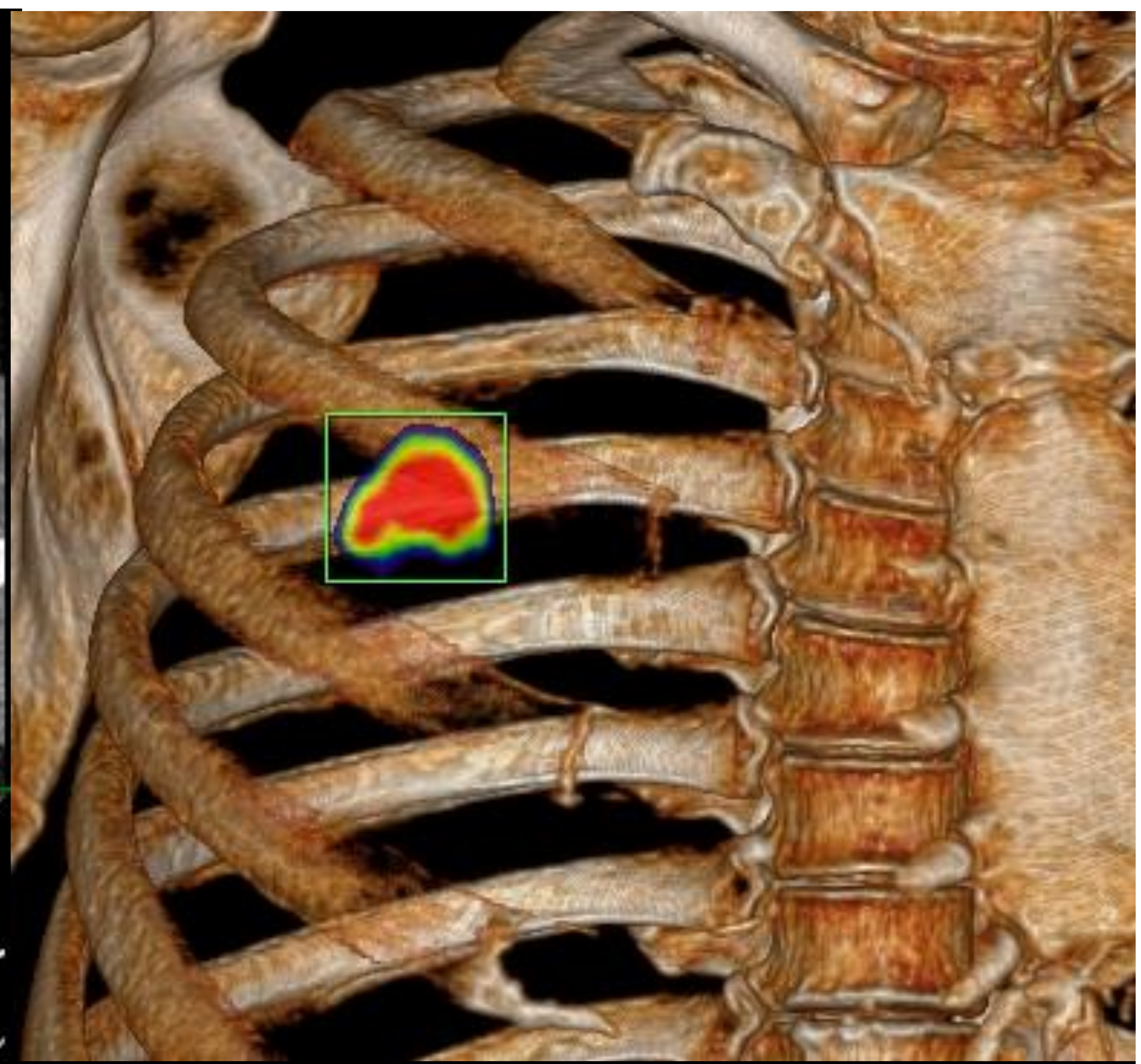


6 Impacto 3D printing híbrido en cáncer de pulmón

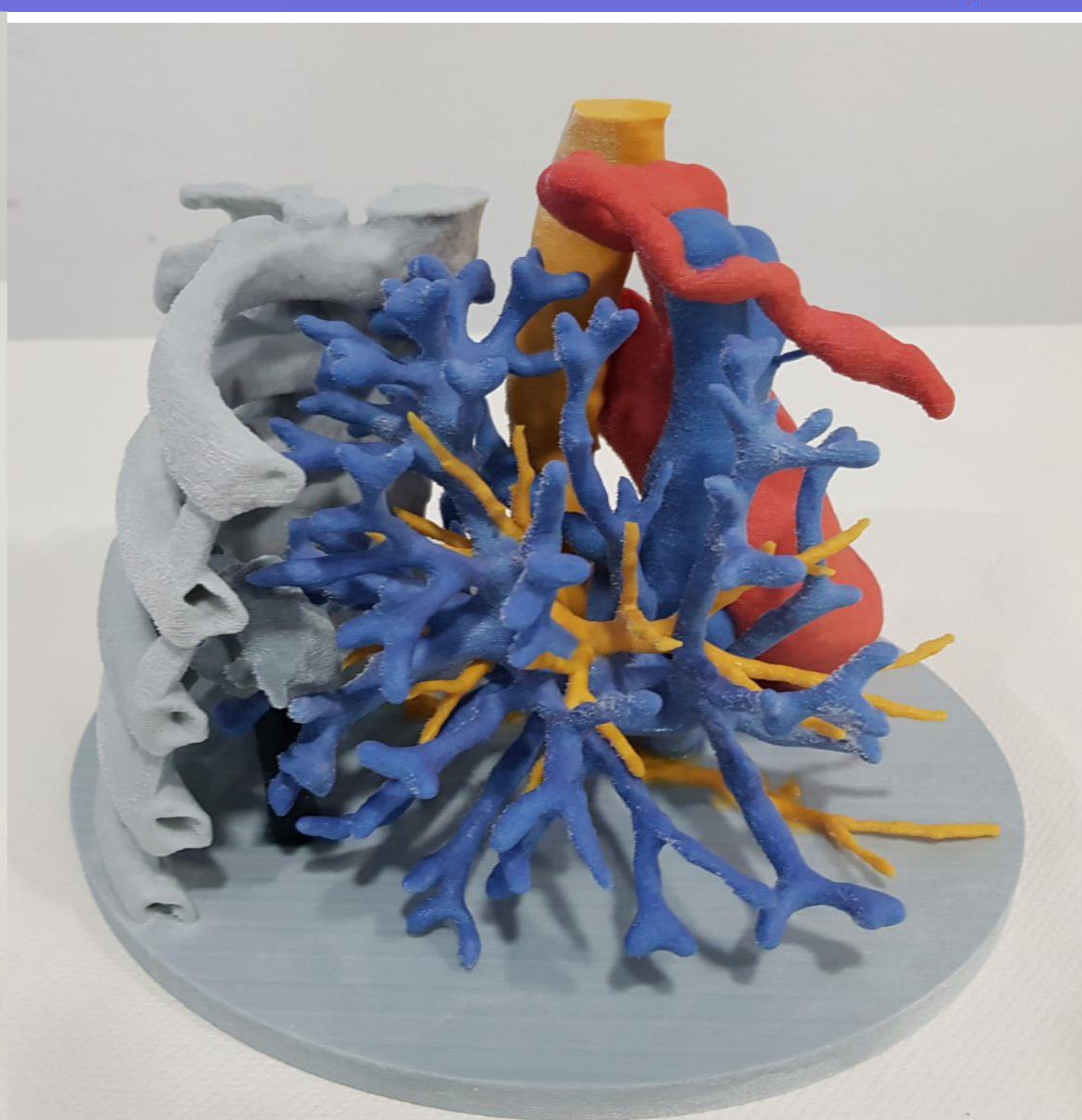
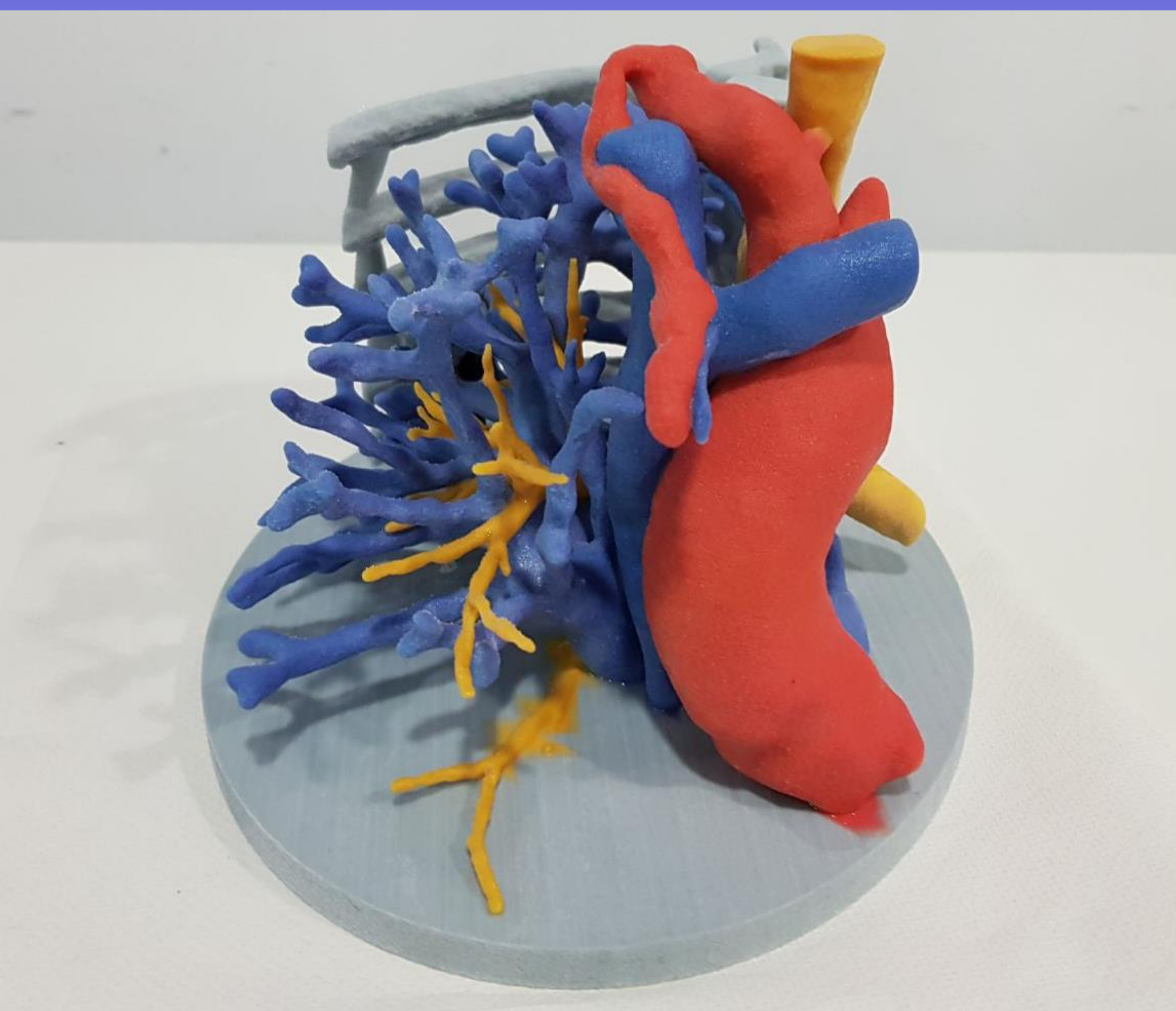
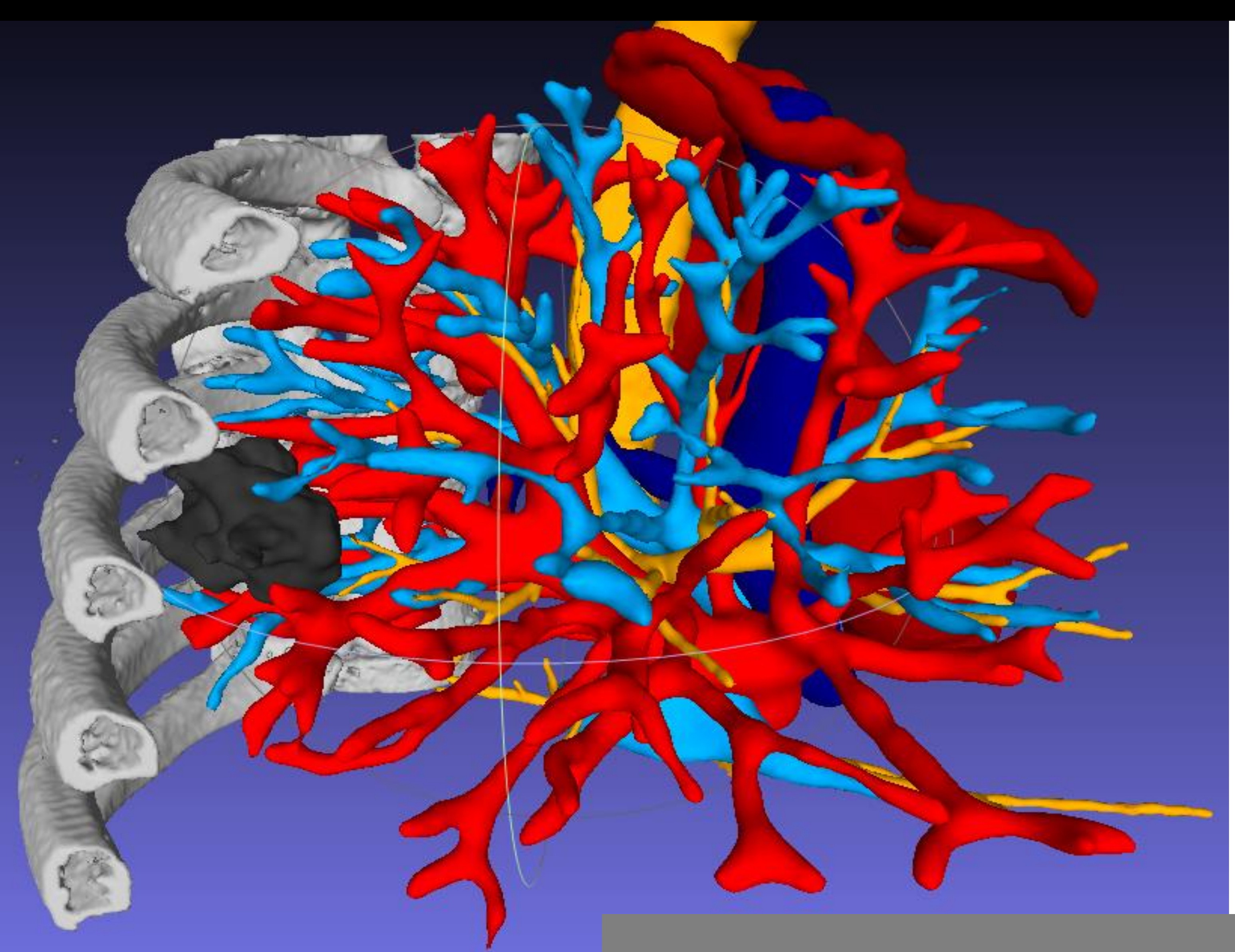
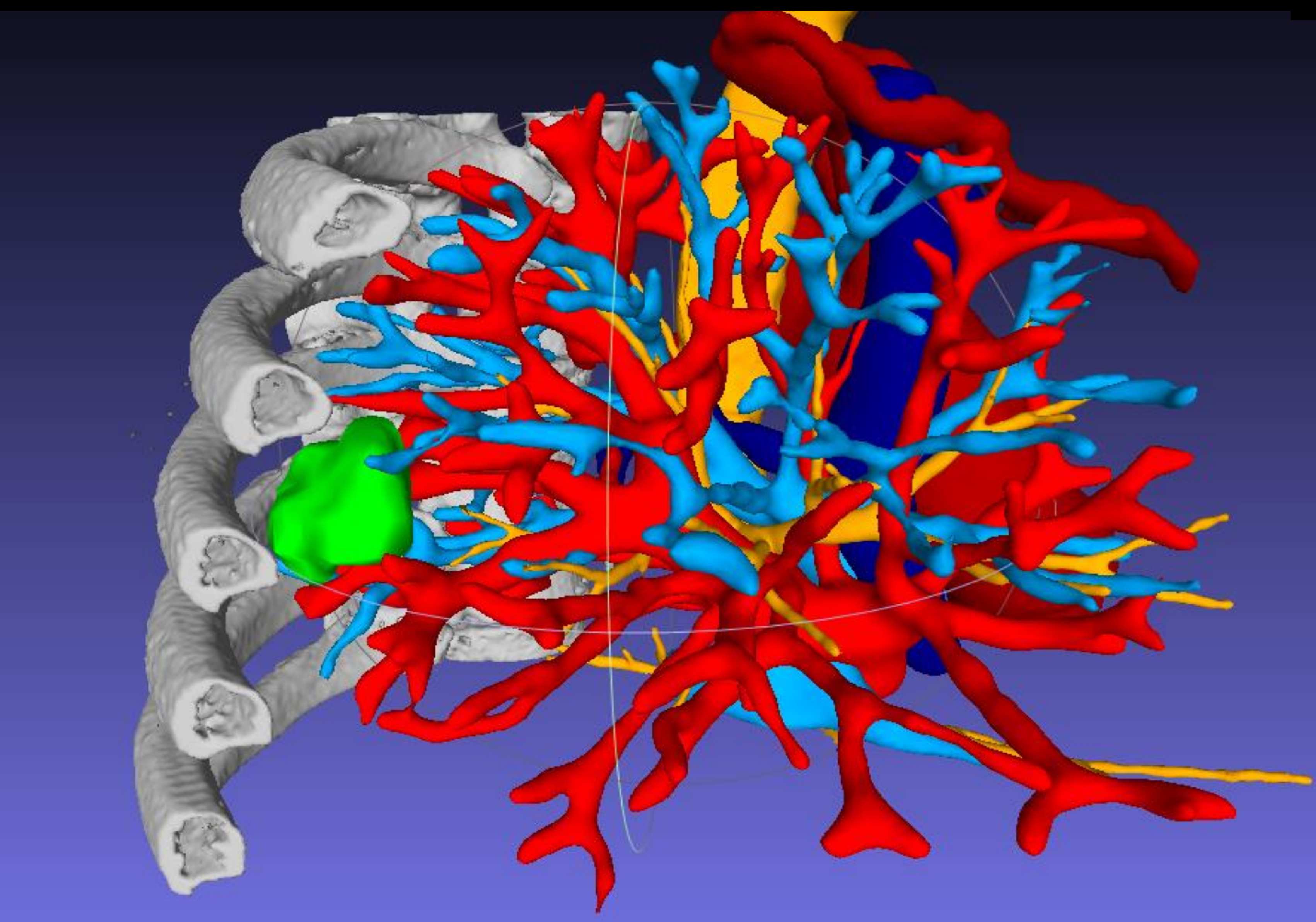
Ejemplos prácticos



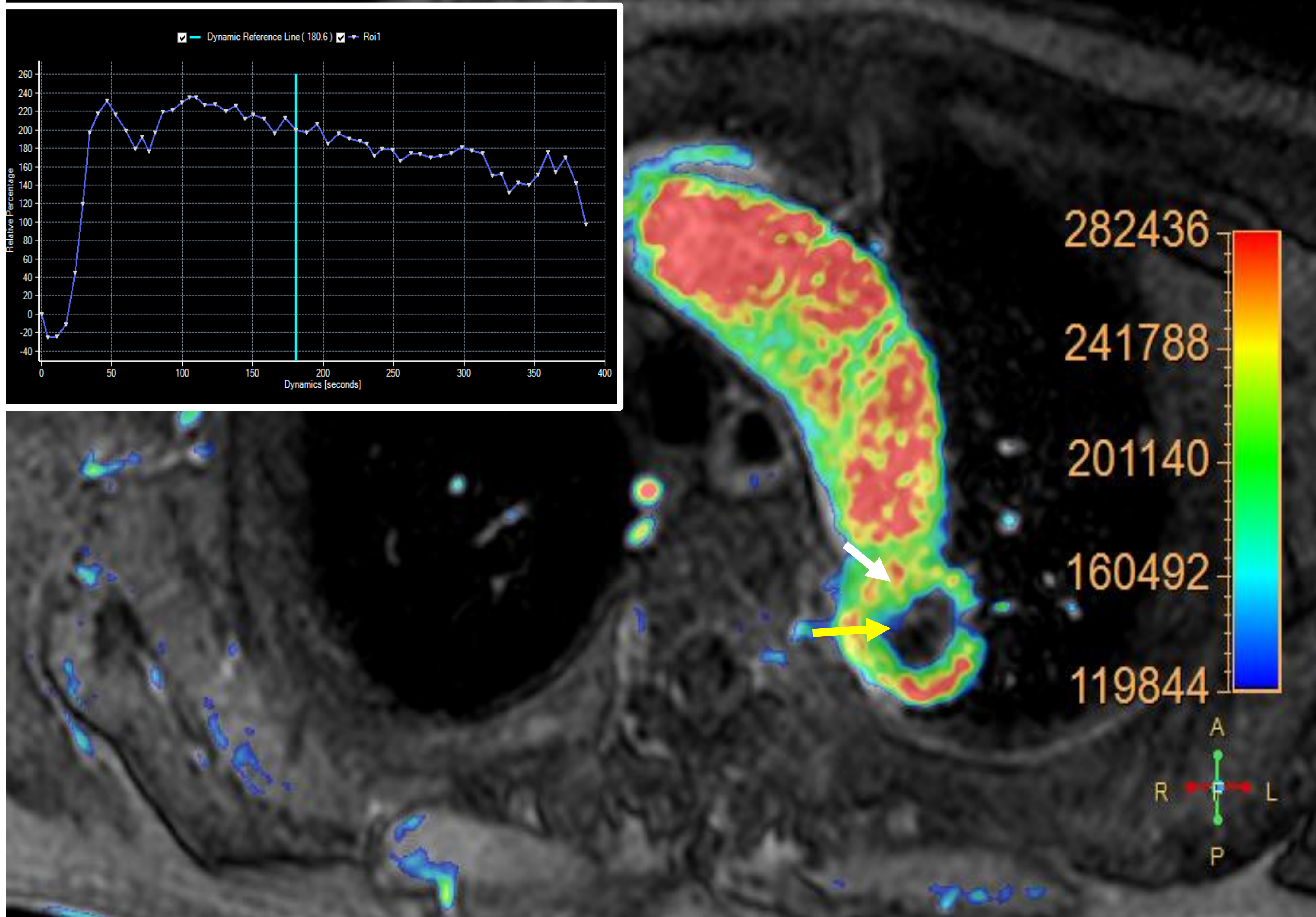
Modelo híbrido TC y RM



Modelo TC

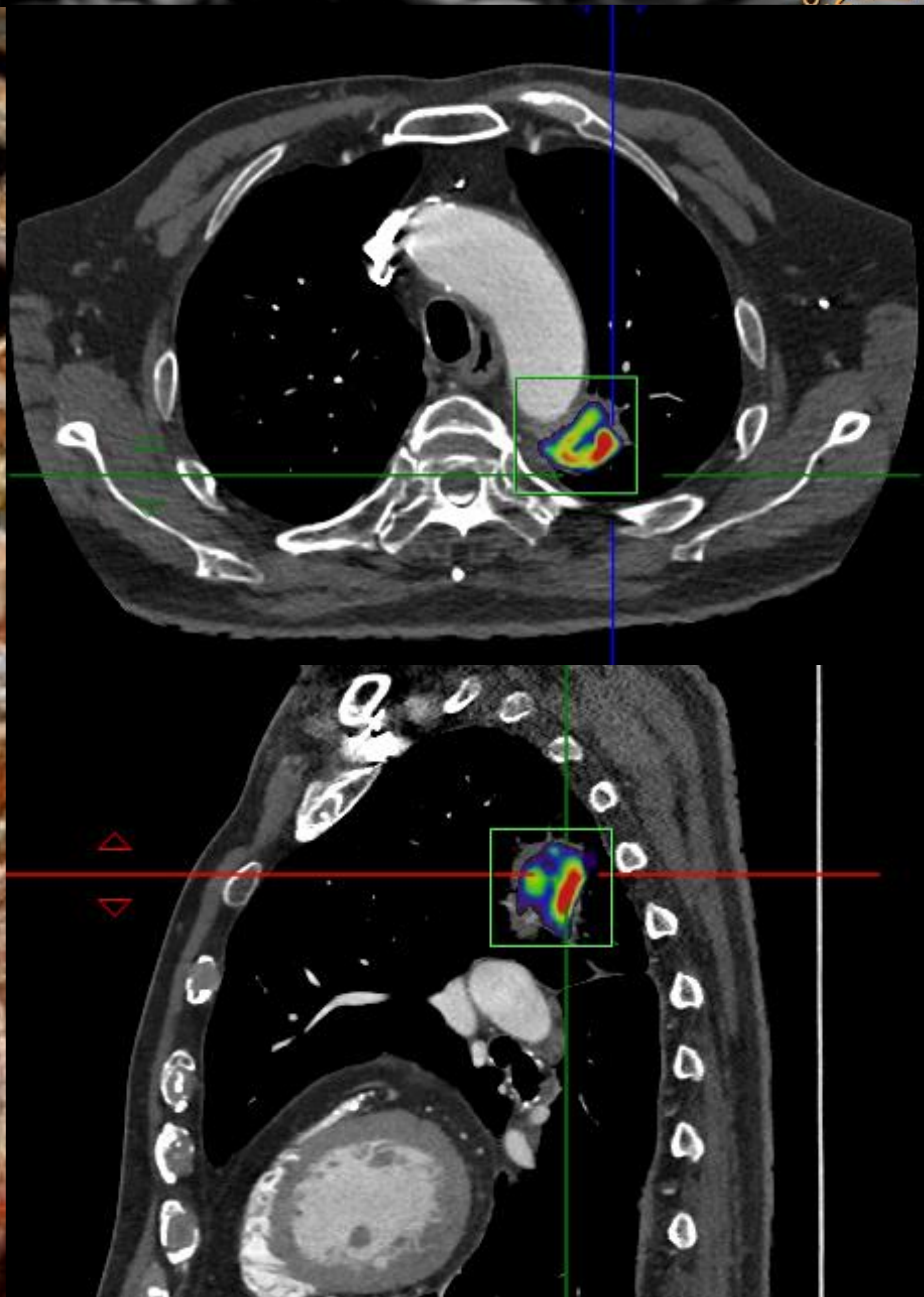
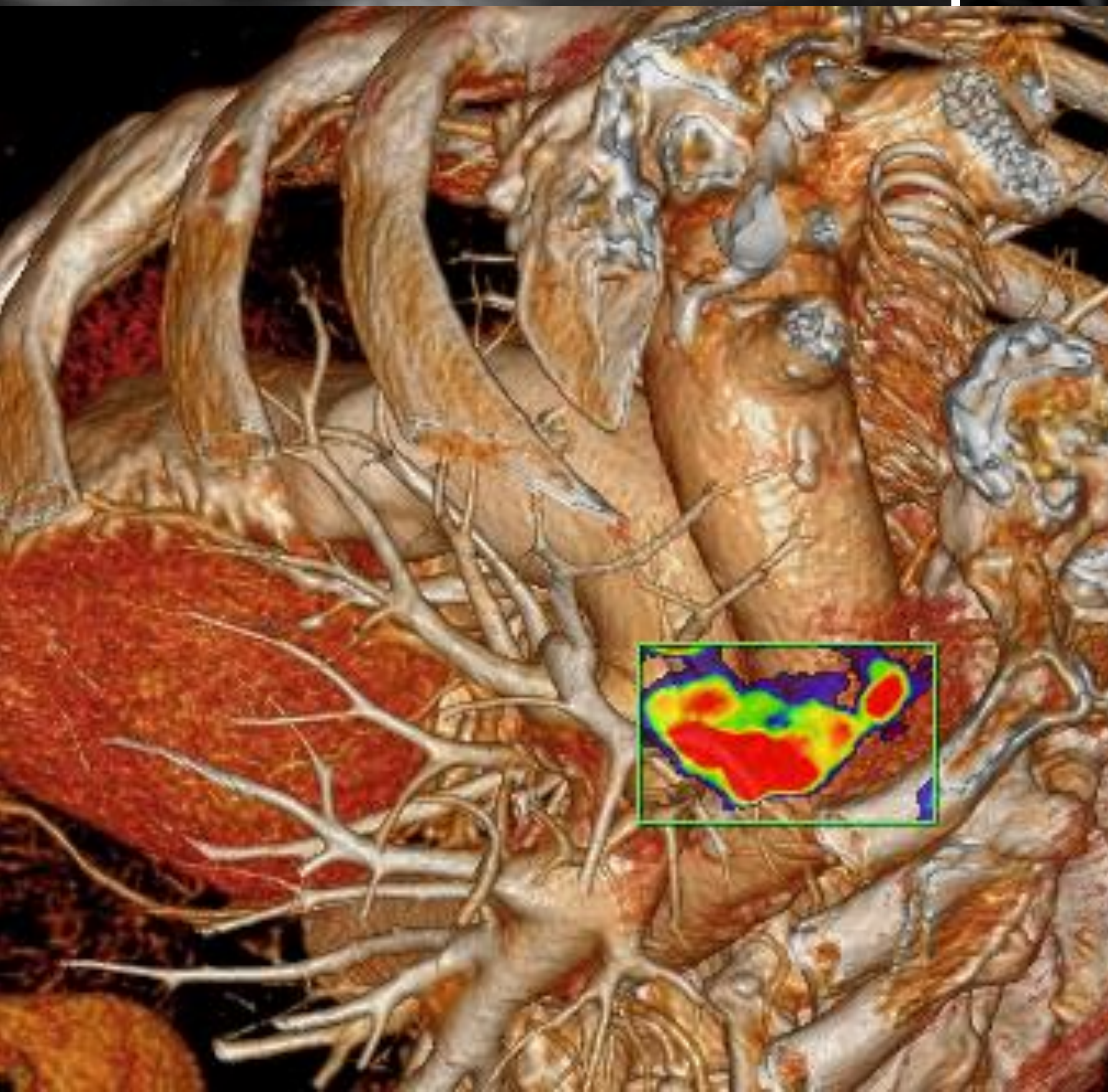
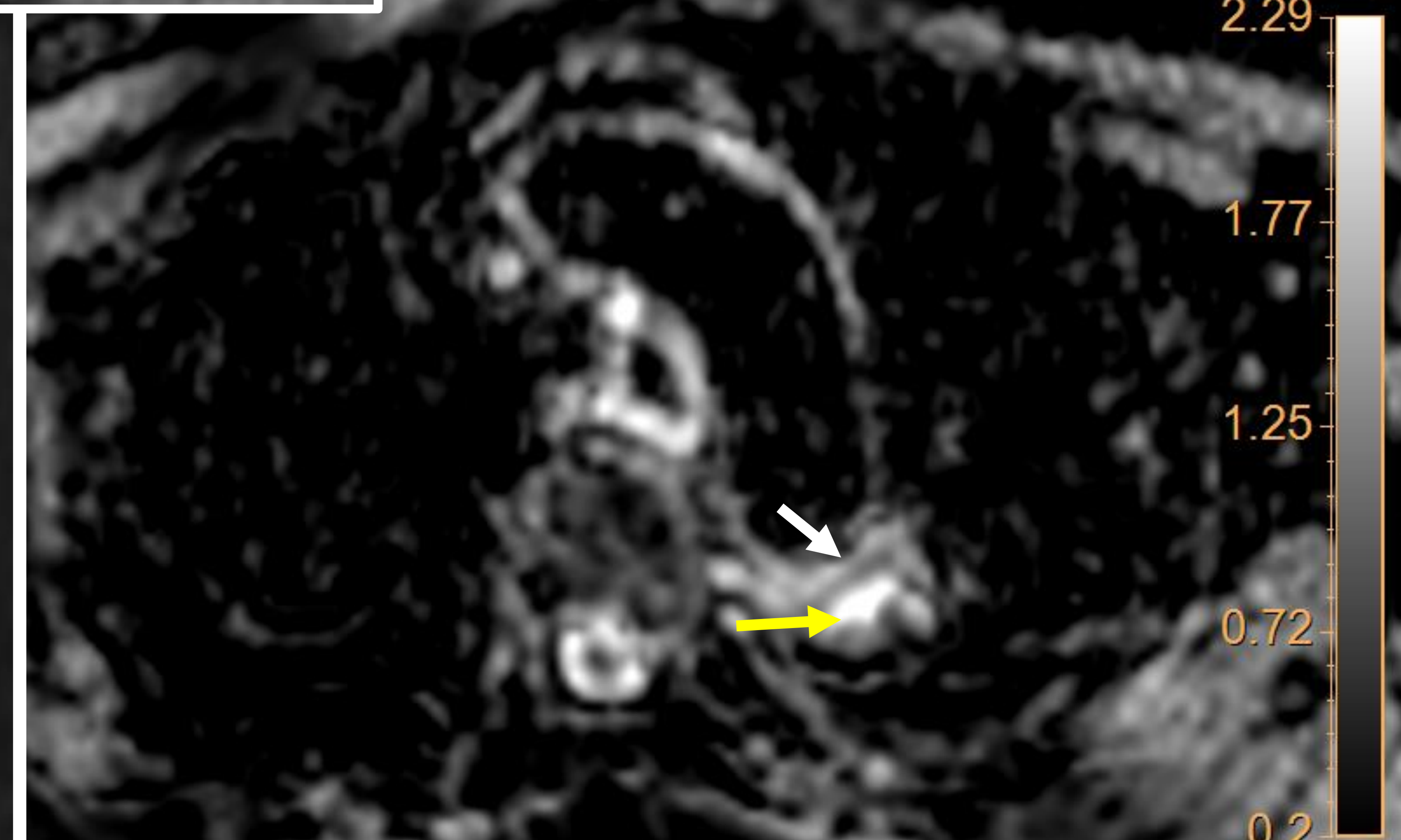
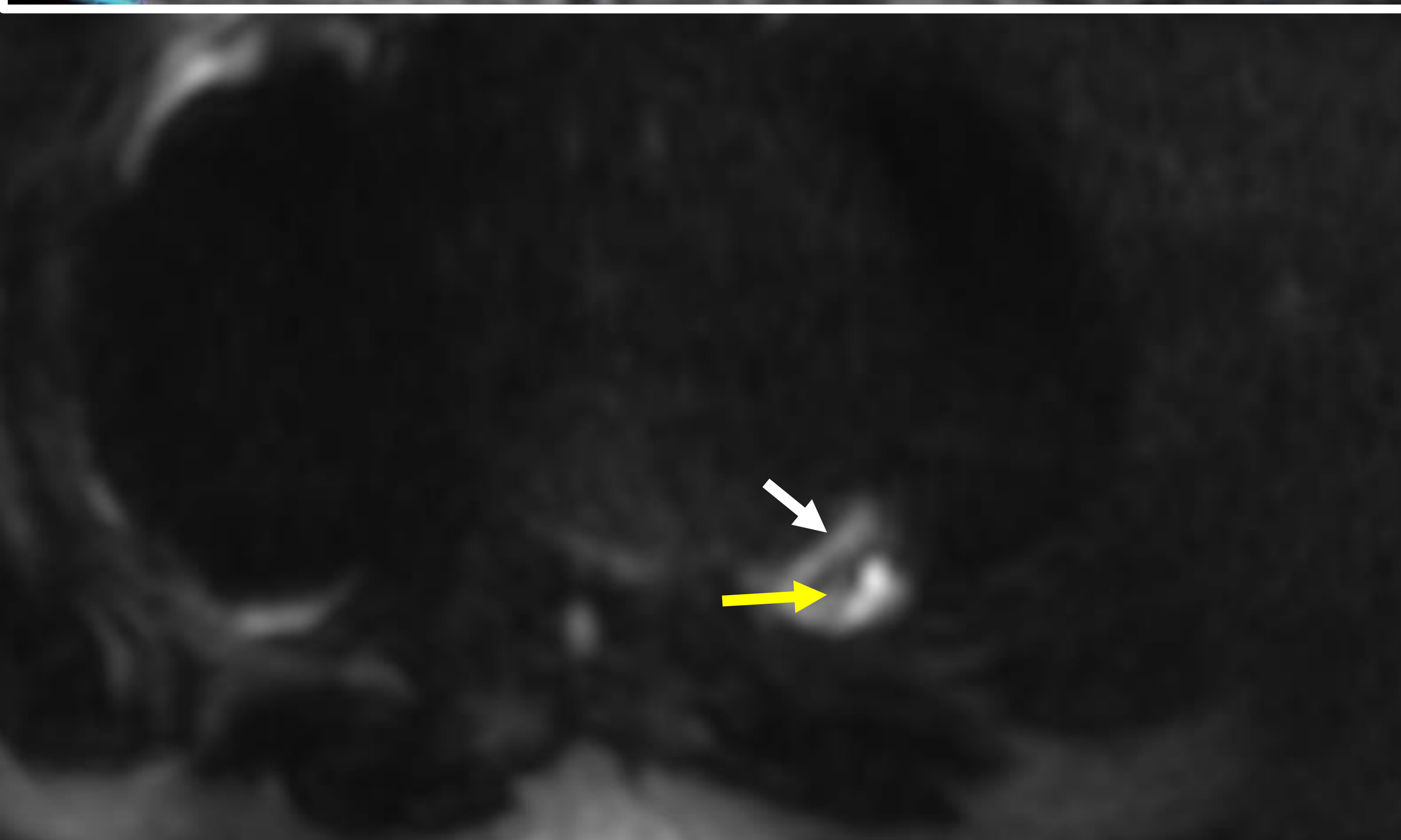


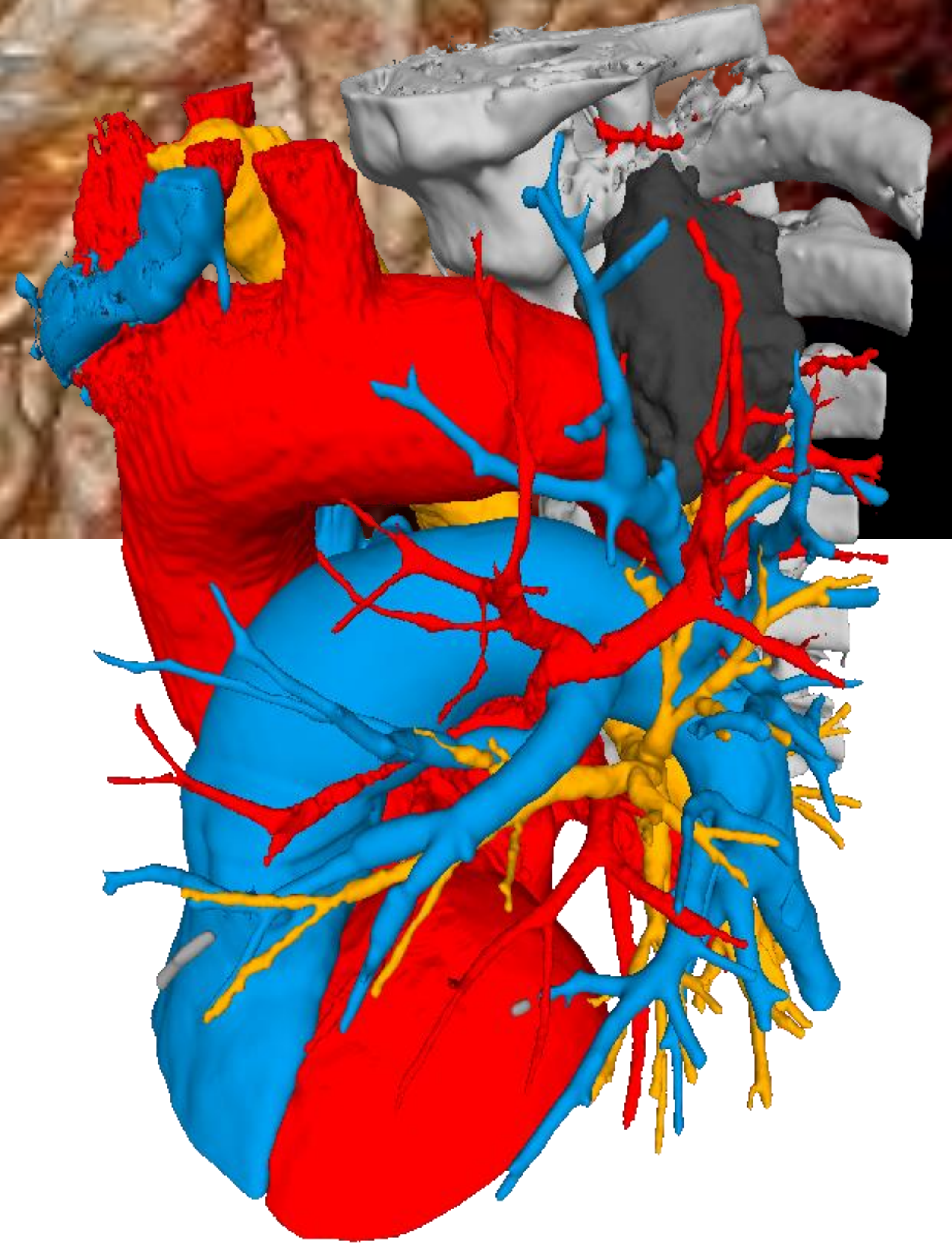
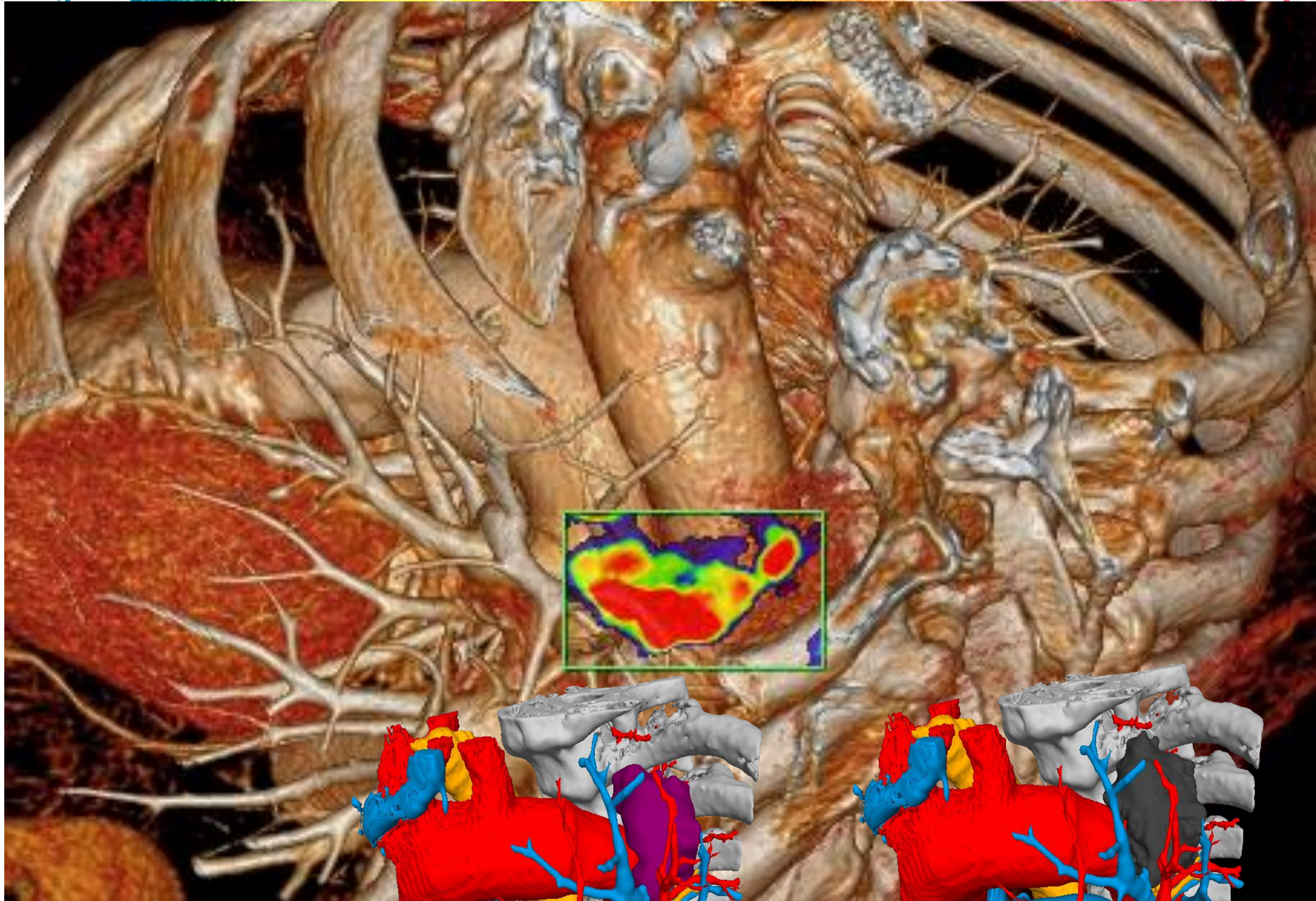
Paciente
varón de 54
años con
adenocarcin
oma de
pulmón
T2N0M0



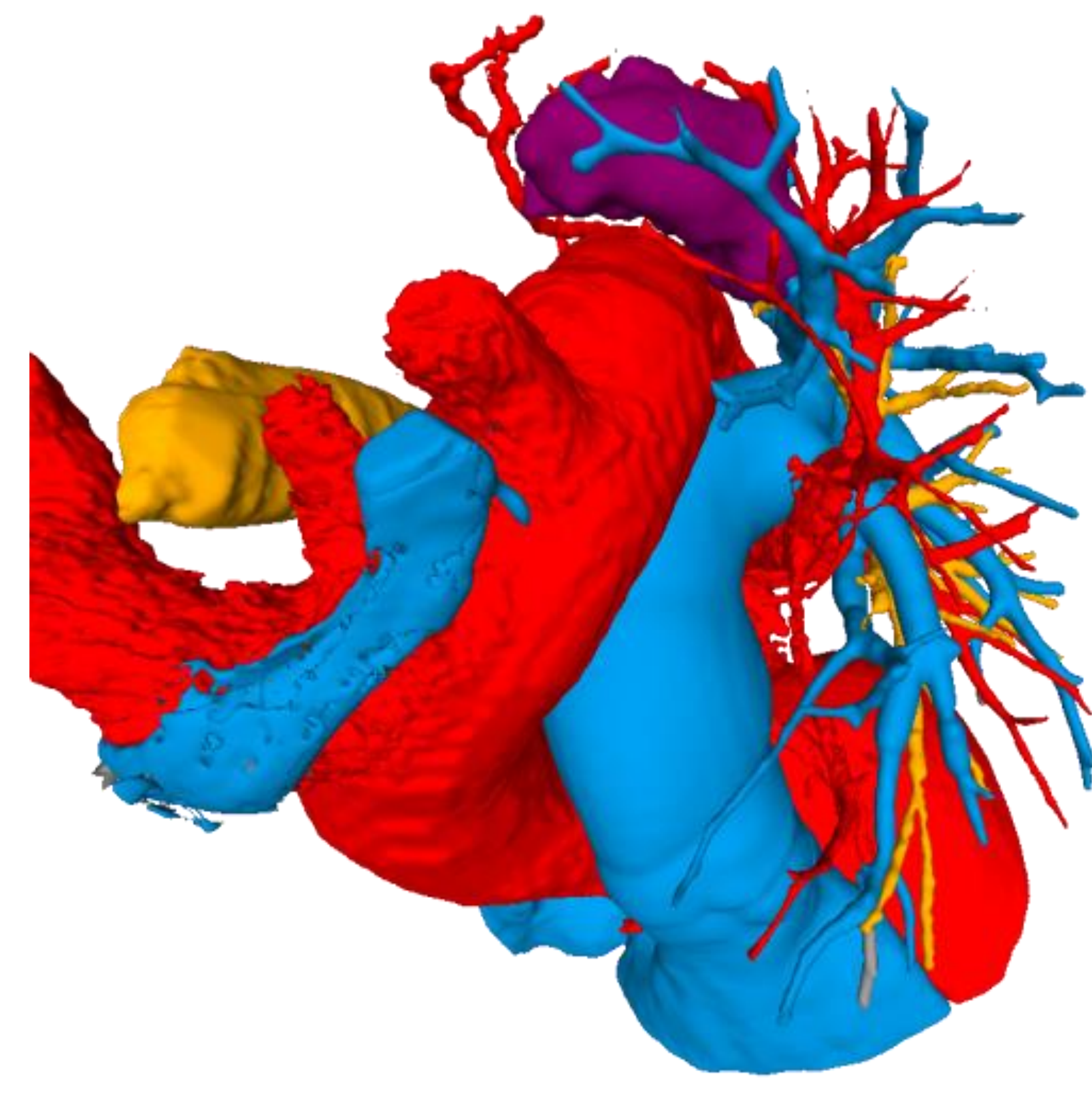
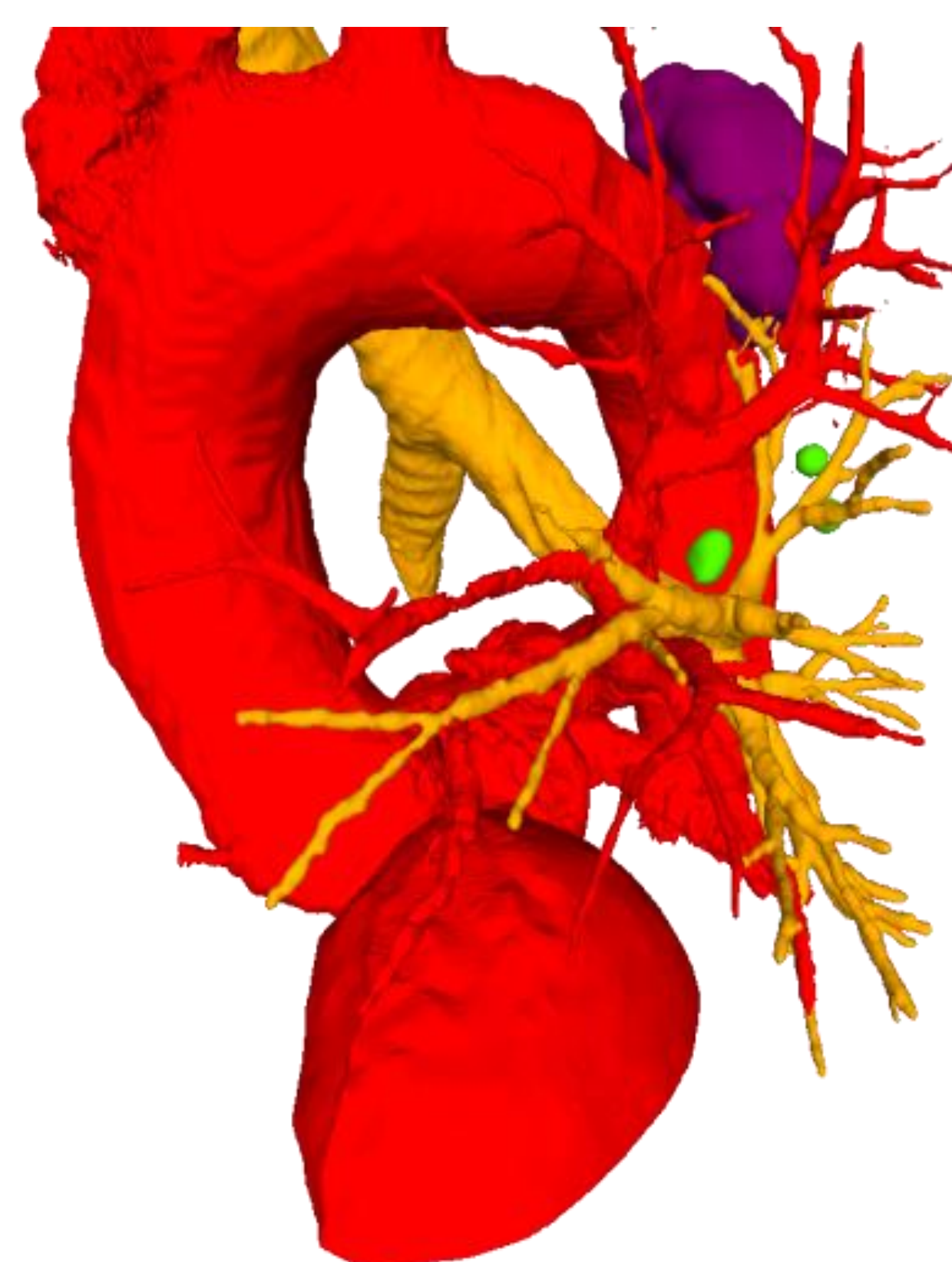
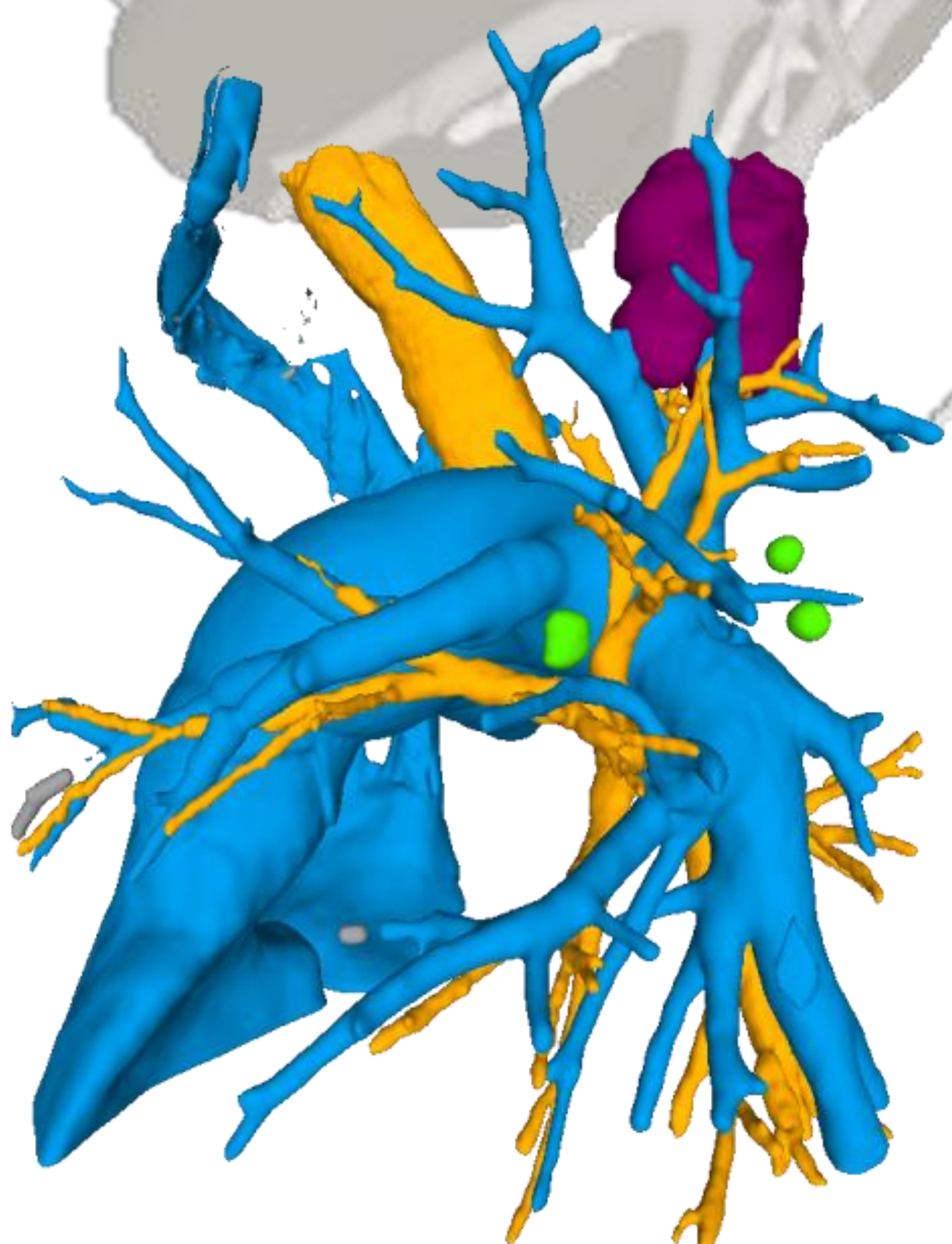
Varón de 72 años con **adenocarcinoma de pulmón** con infiltración de pleura mediastínica.

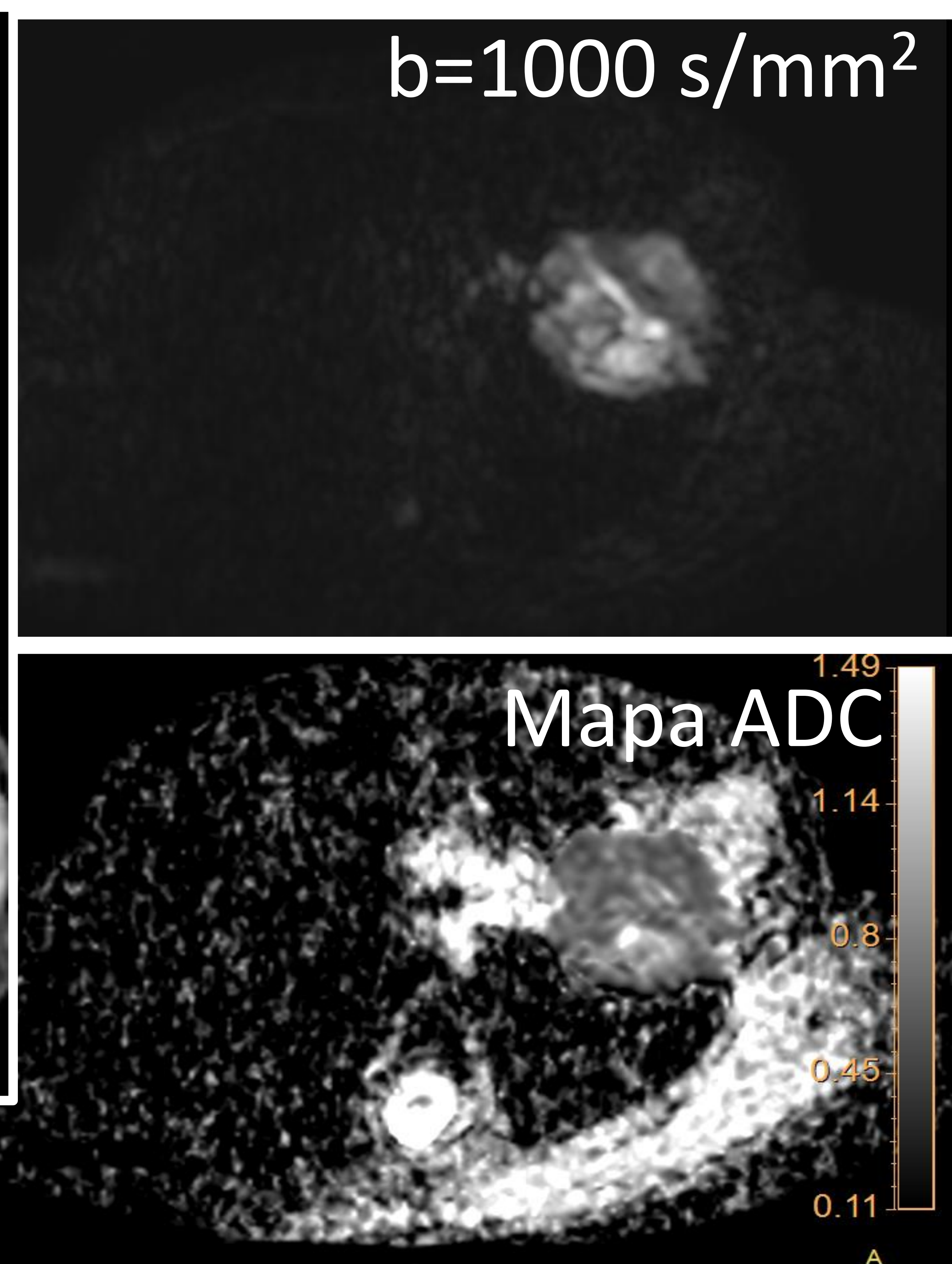
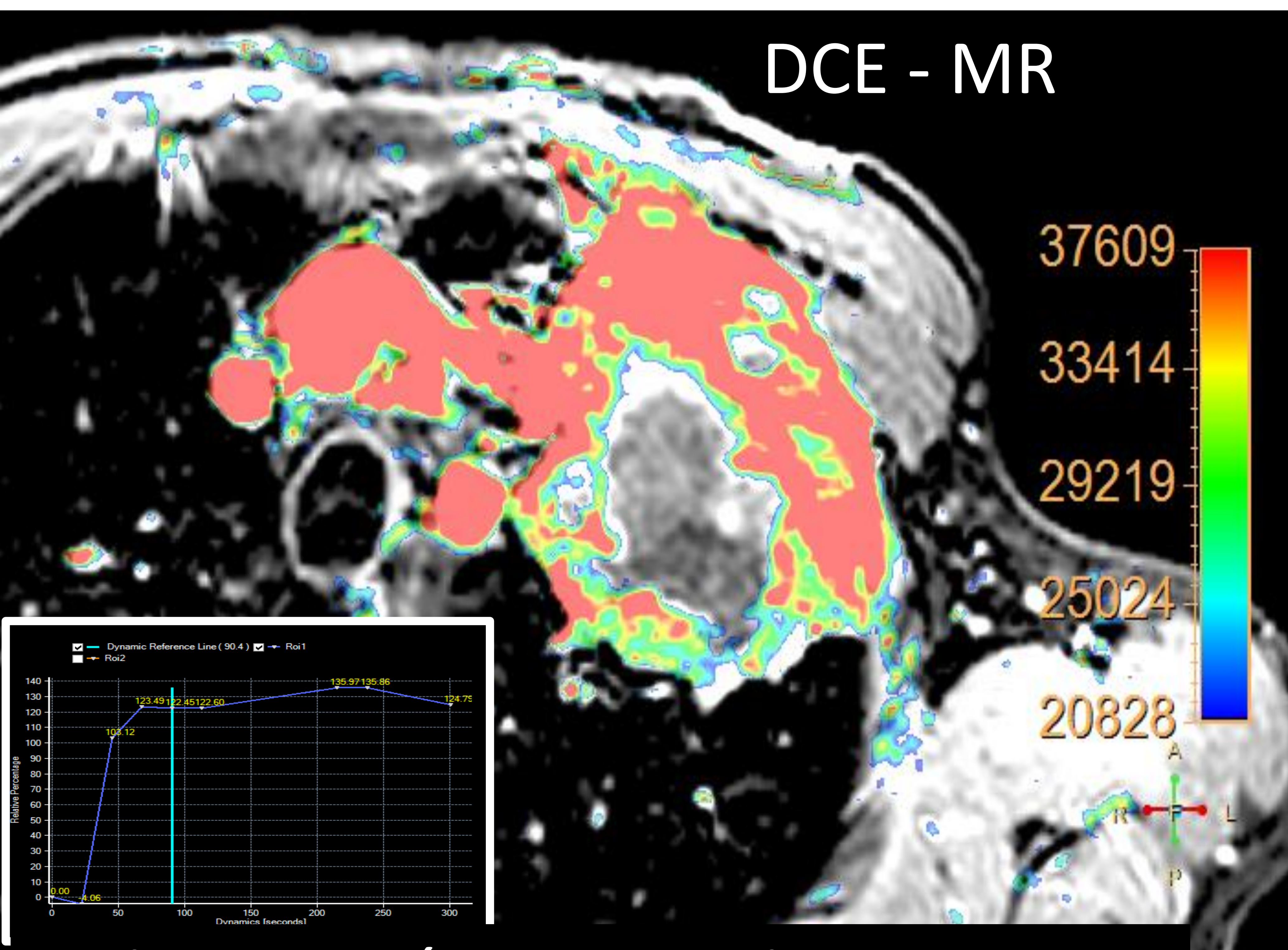
Comportamiento diferencial del tejido tumoral (Flecha blanca; hipervascular en DCE-MR y restrictivo en difusión) respecto a la necrosis central (flecha amarilla; $ADC_{\text{tumor}}: 0,55 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$; $ADC_{\text{necrosis}}: 2,54 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$).



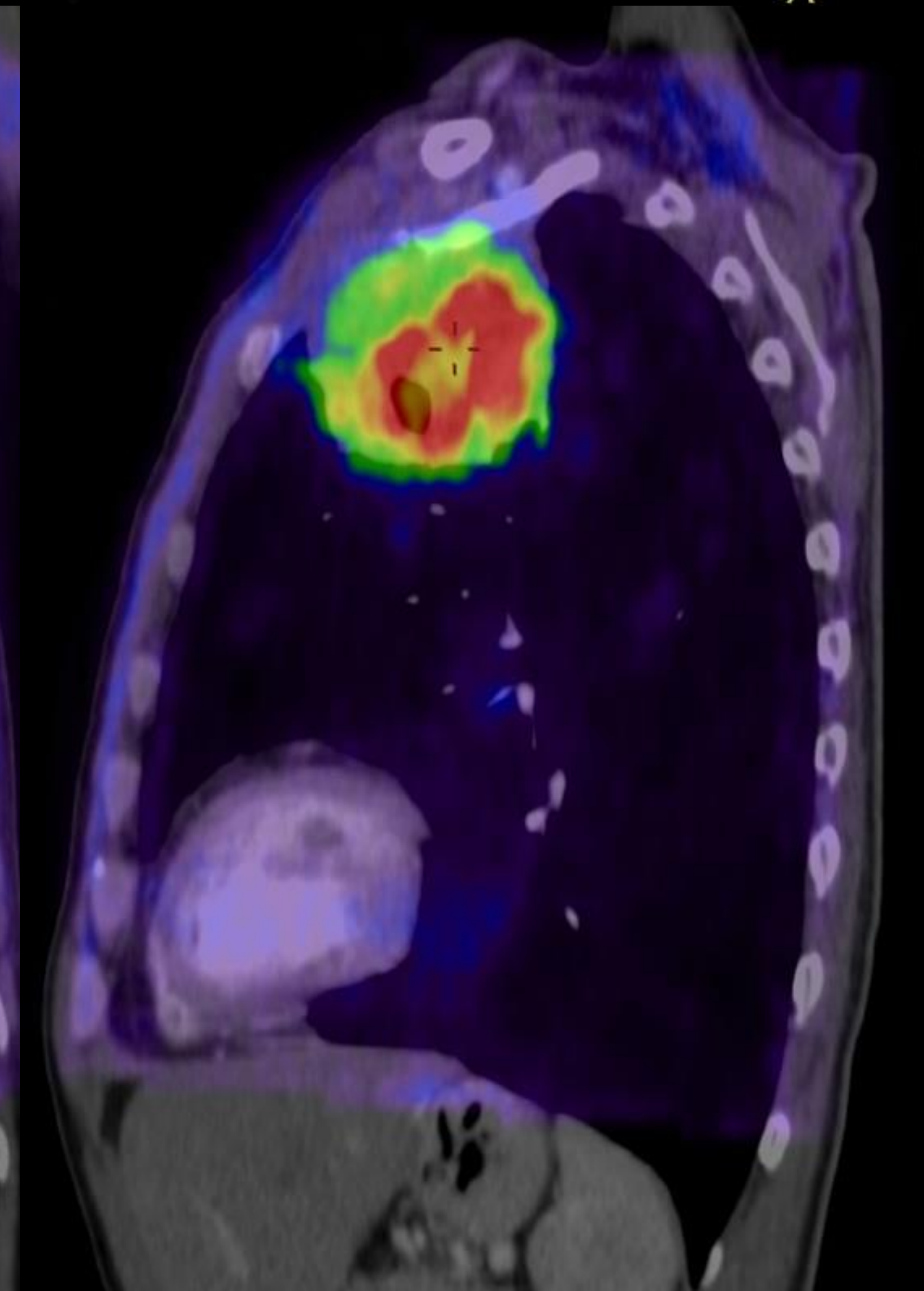
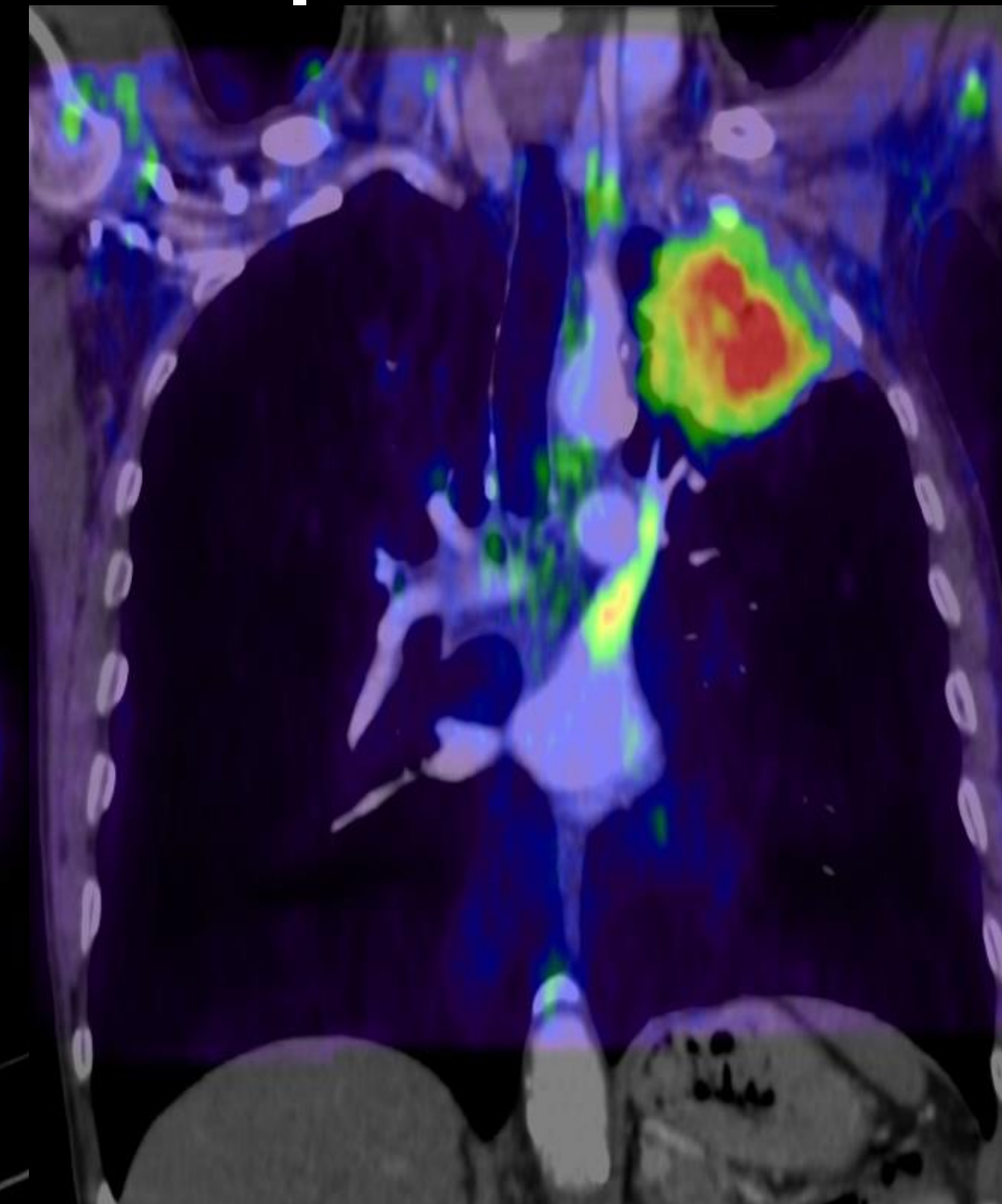
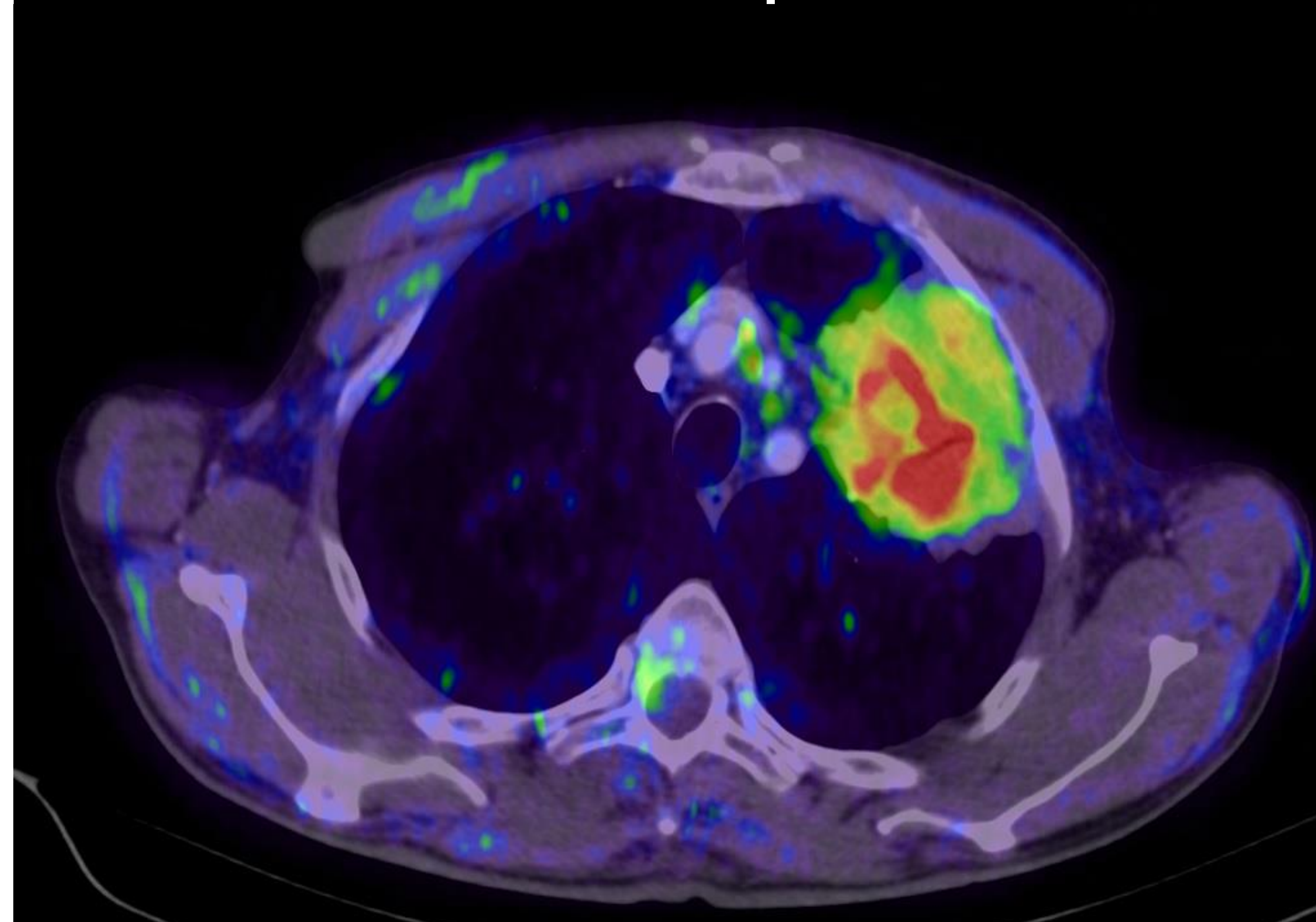


MODELO HÍBRIDO TC + DWI MODELO TC

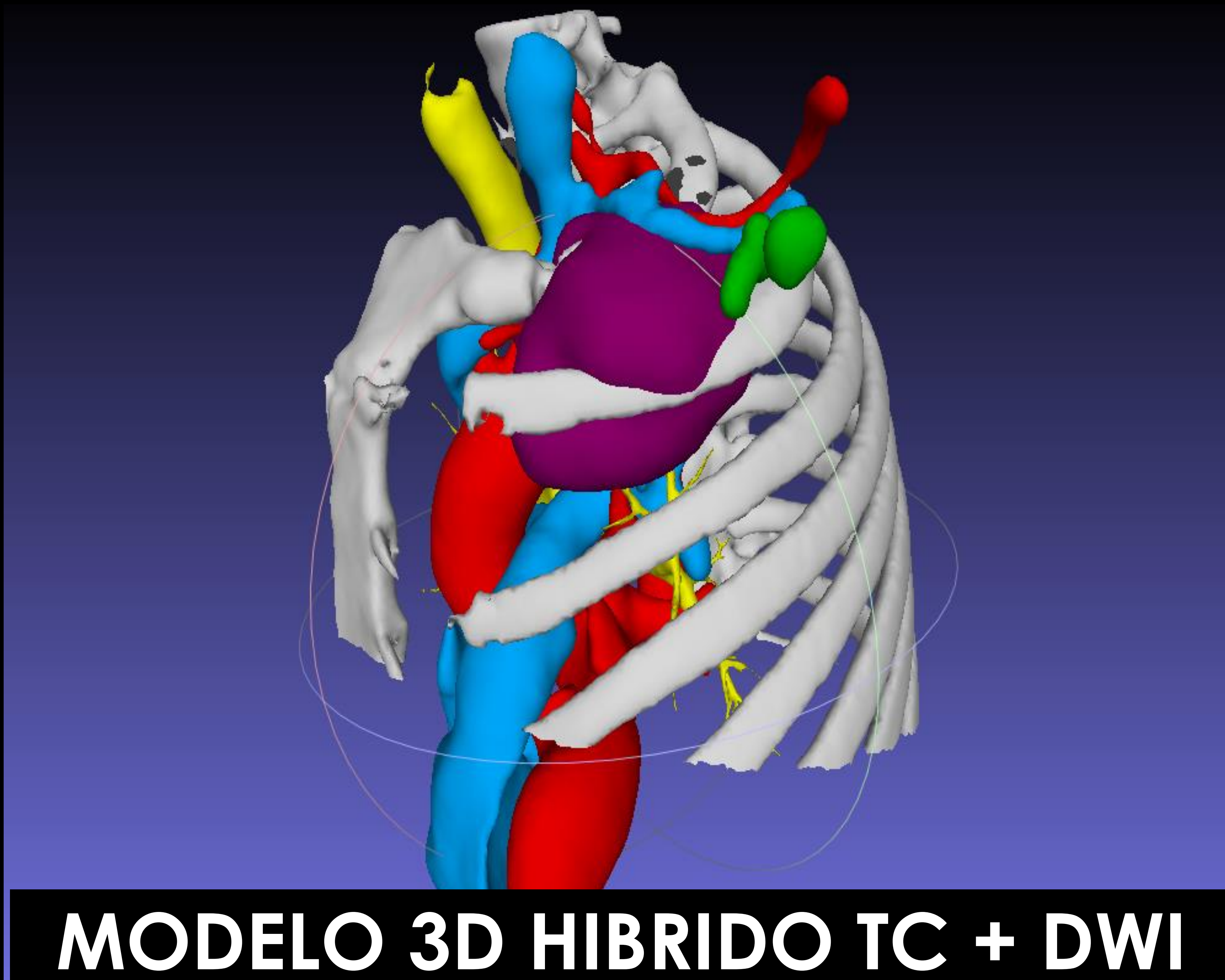
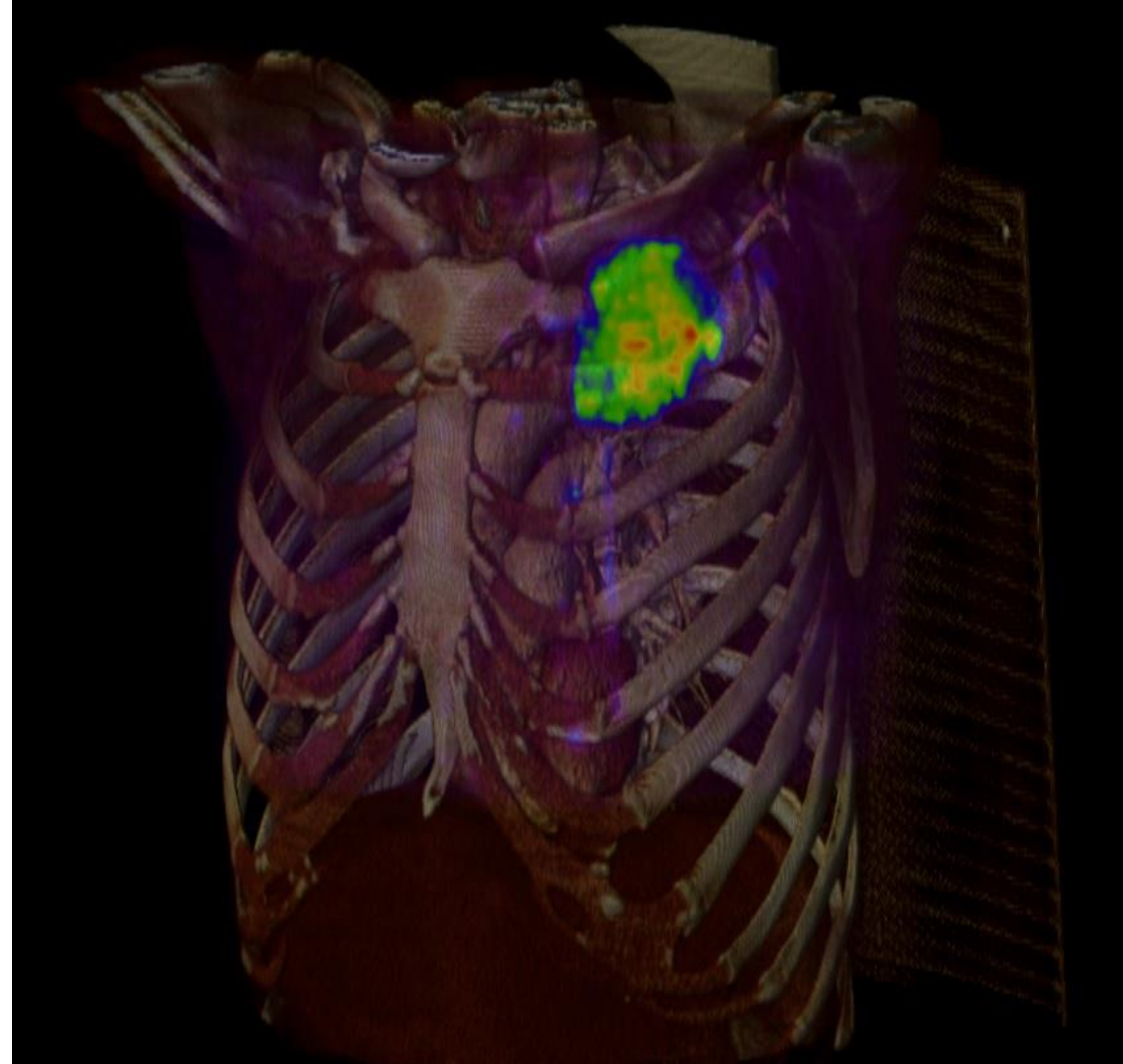




Paciente varón con carcinoma indiferenciado de pulmón oat cell

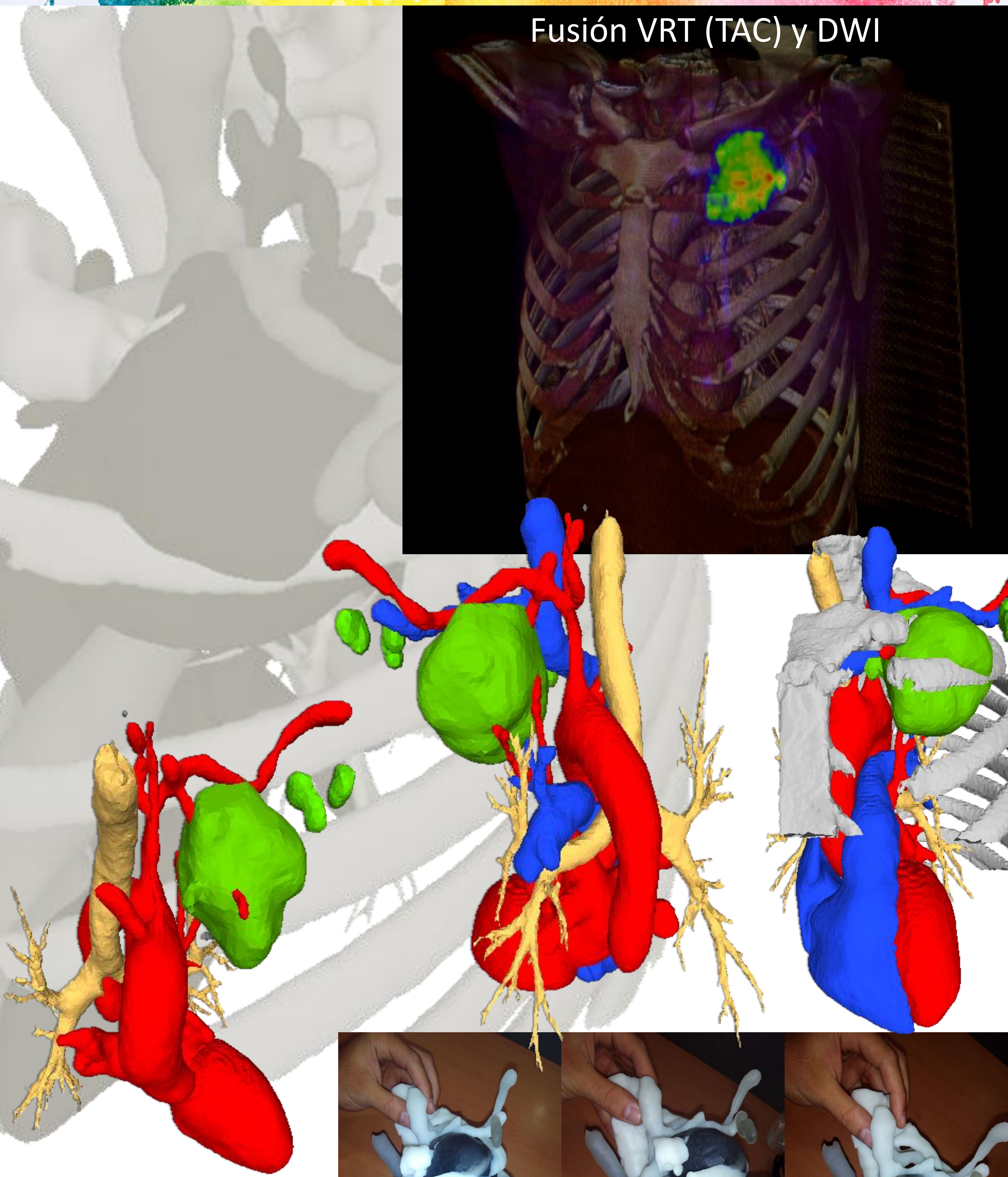


FUSIÓN TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA + DWI ($b=1000 \text{ s/mm}^2$)

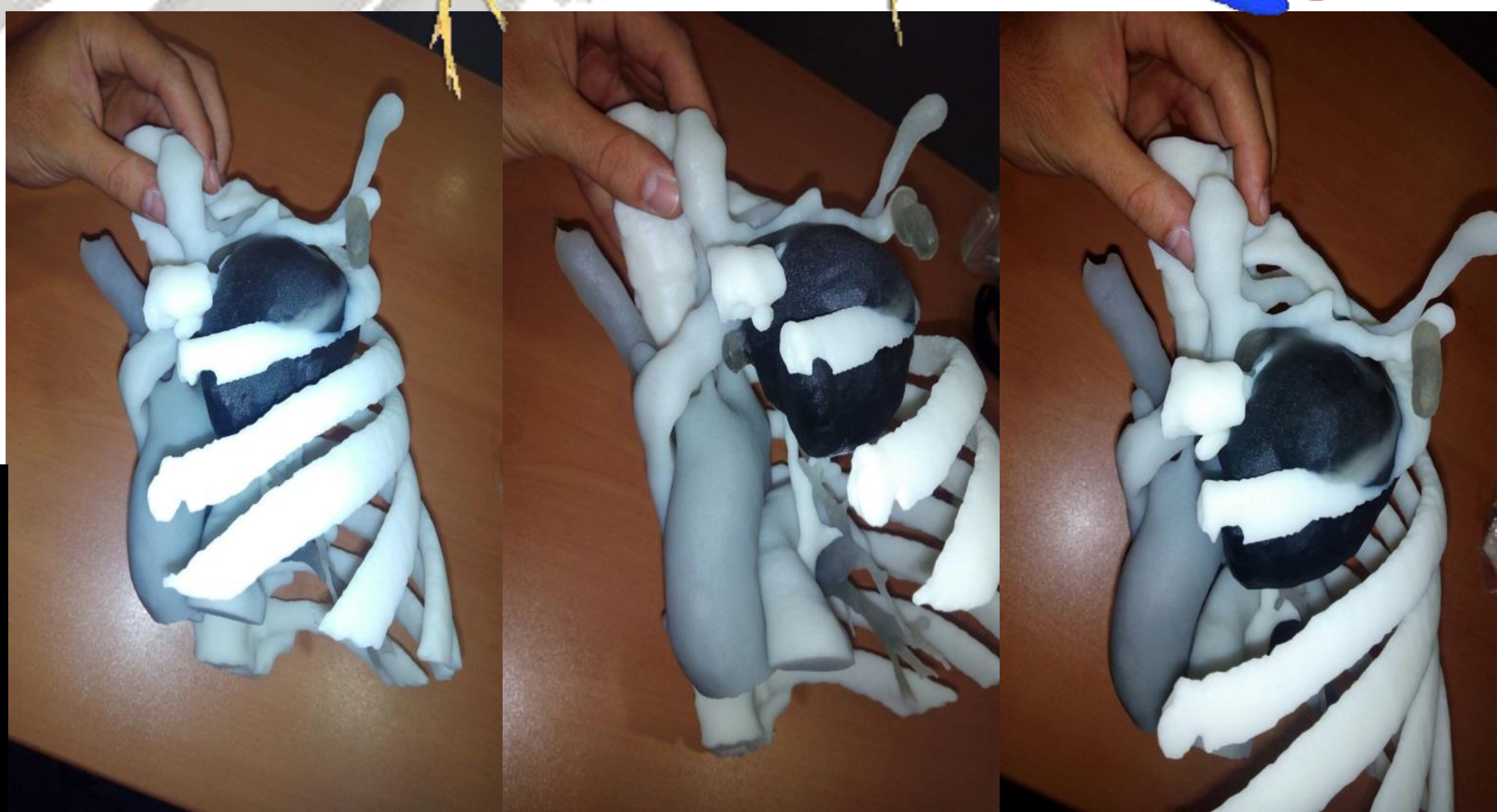


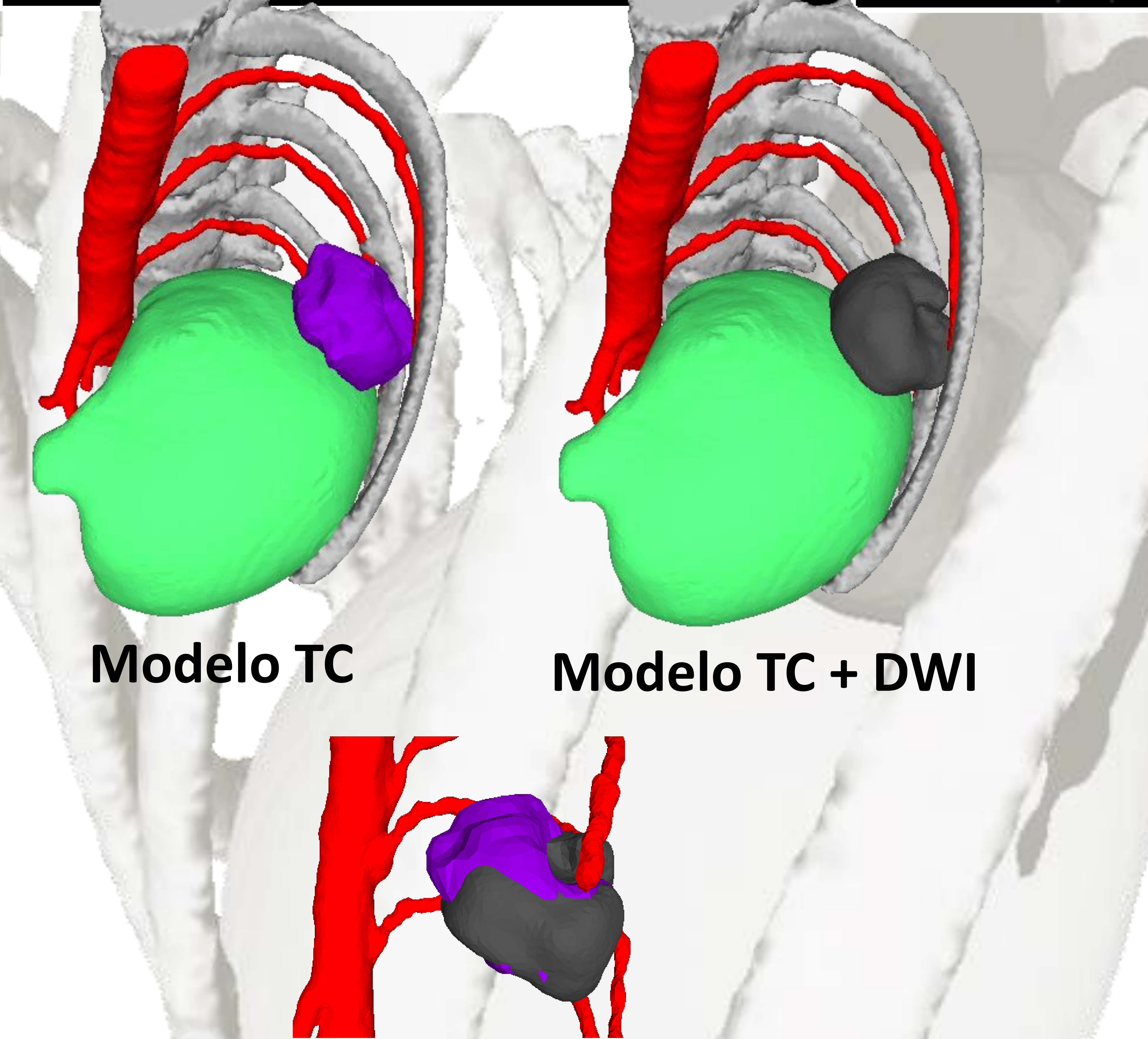
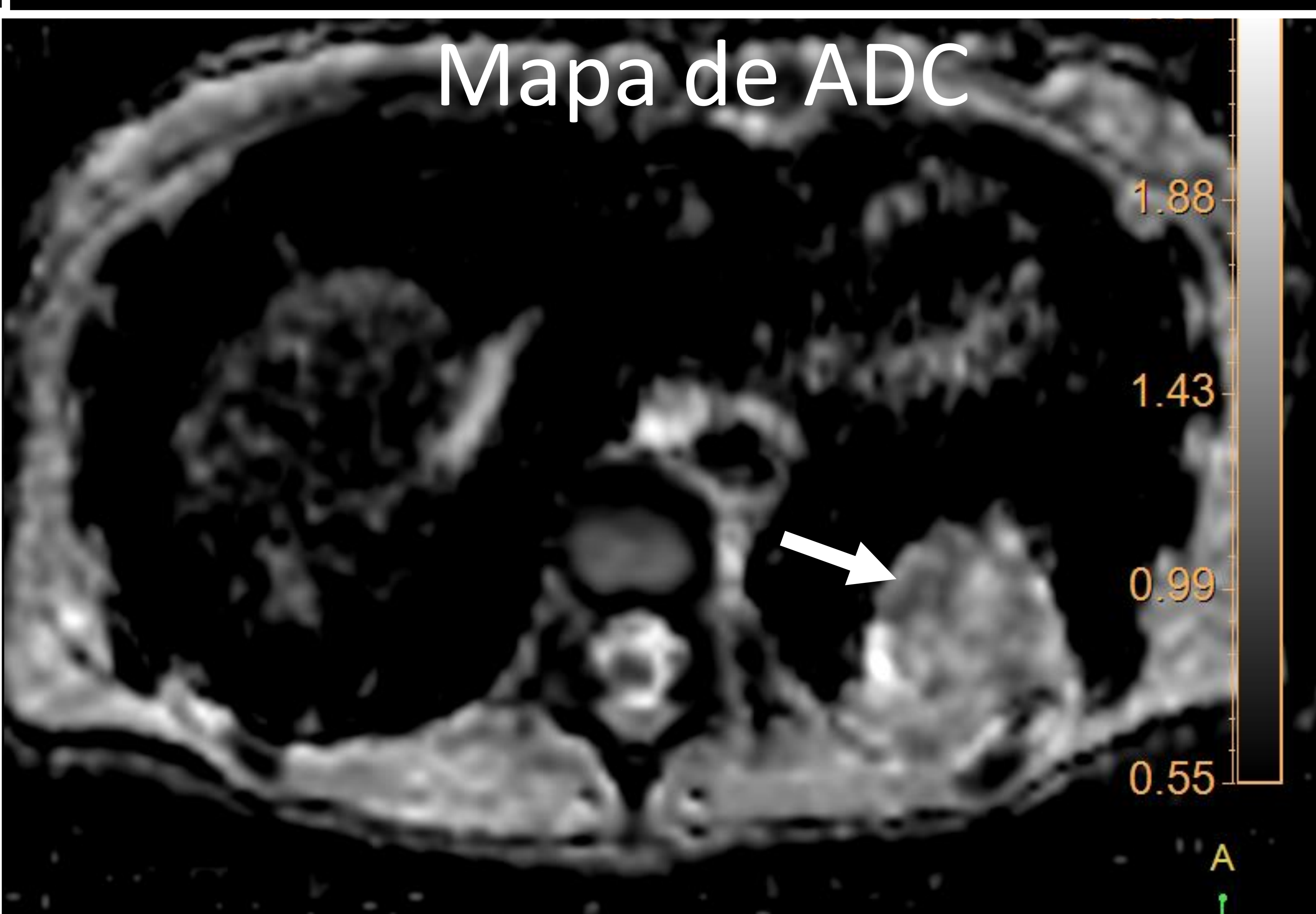
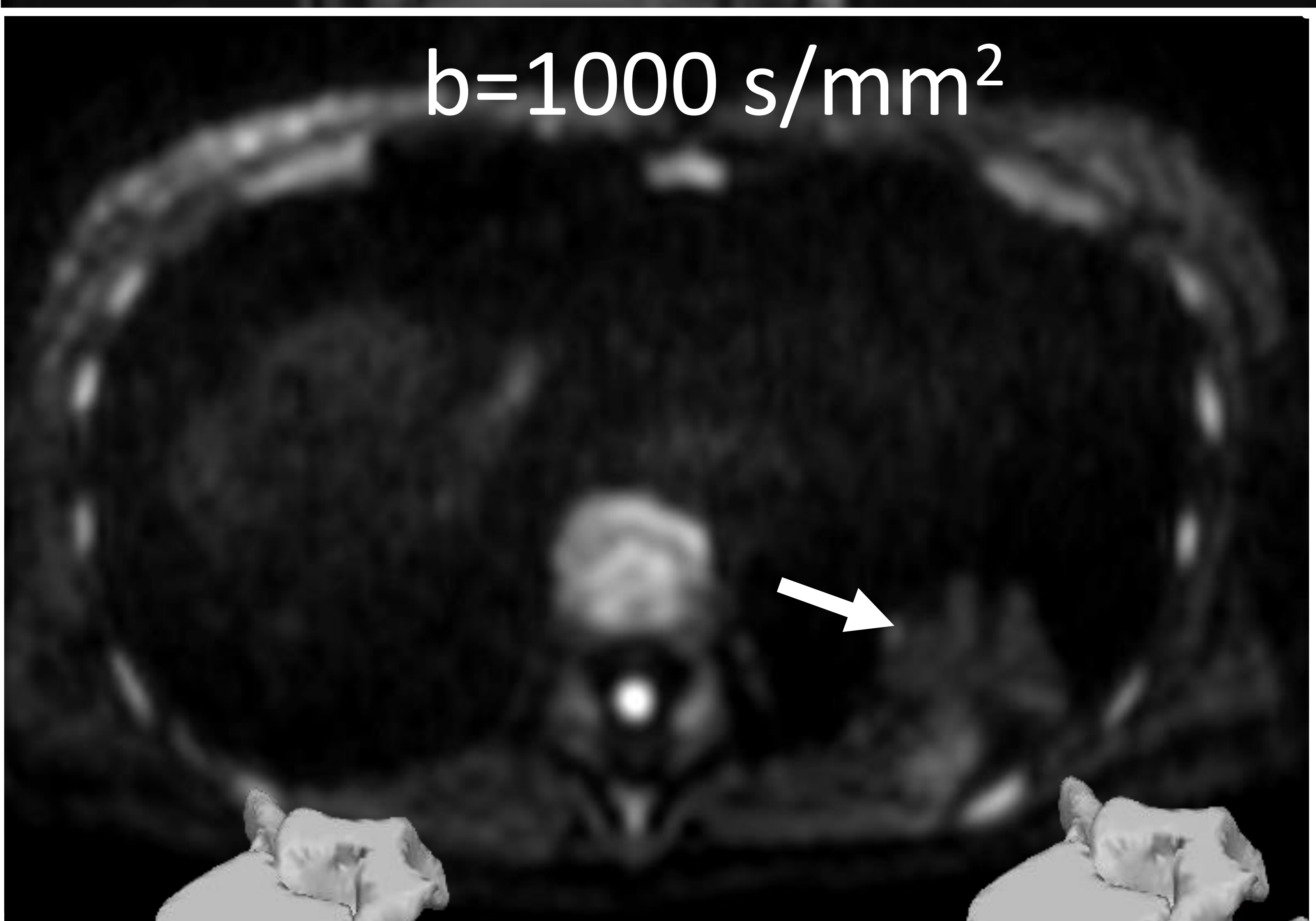
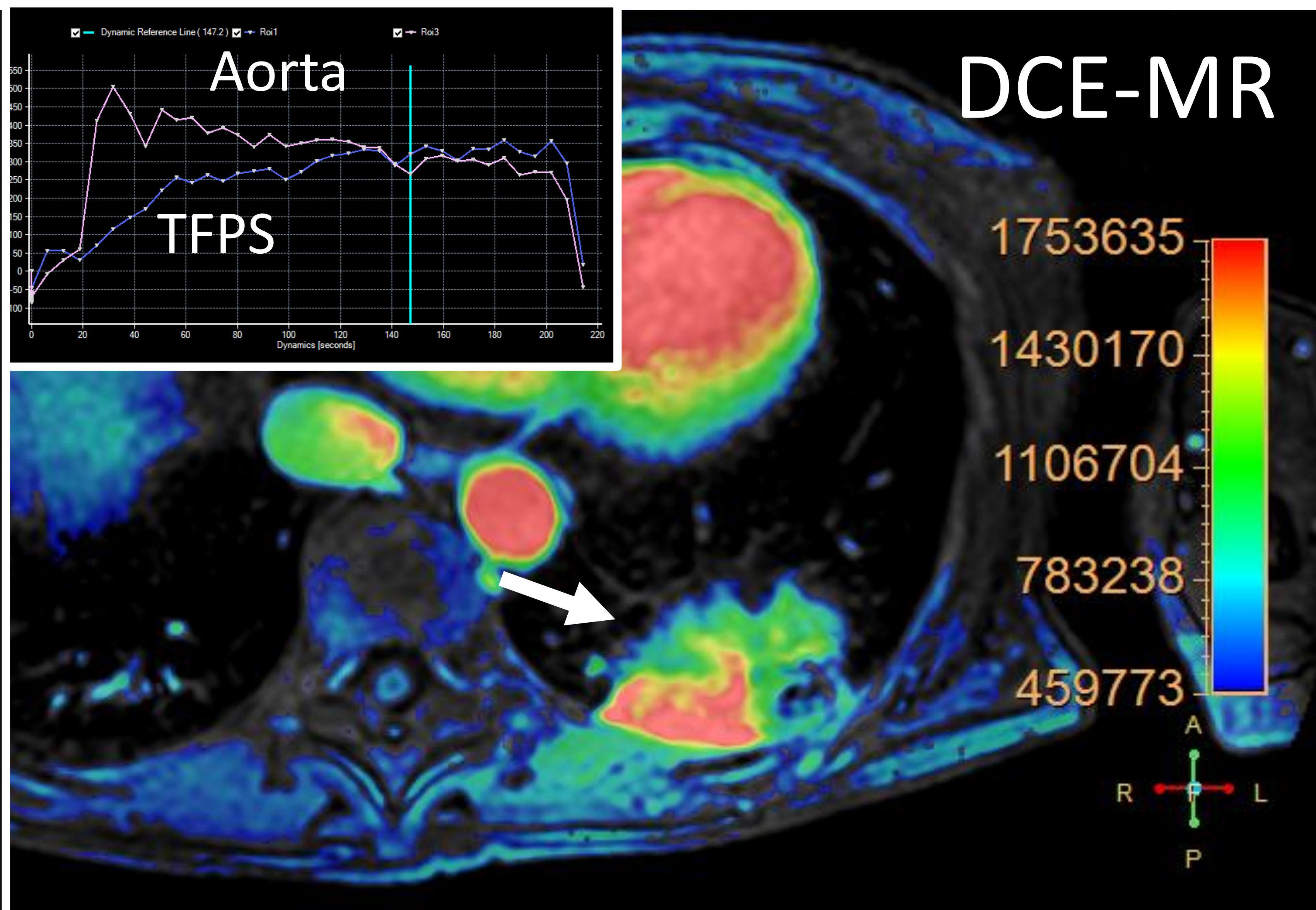
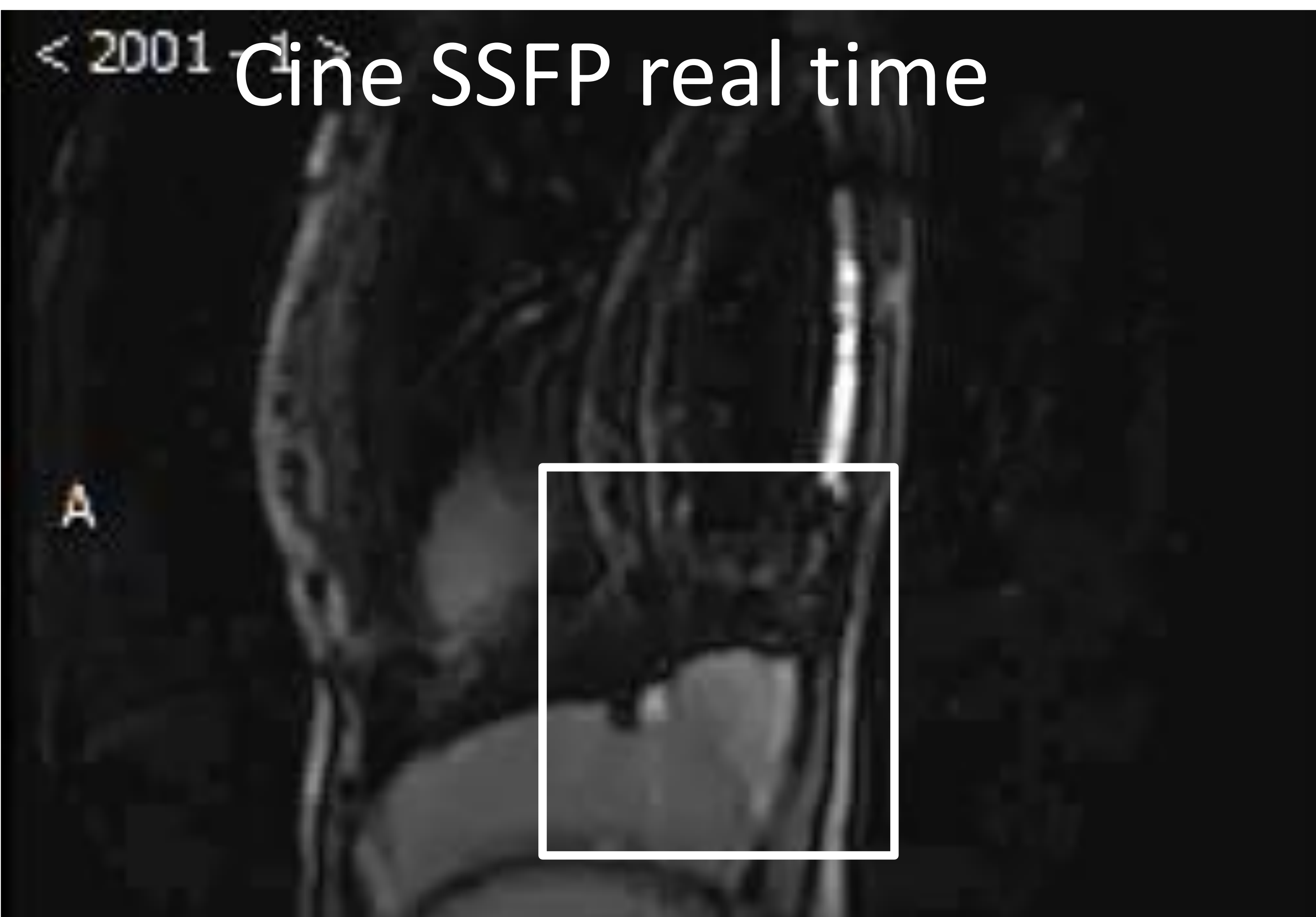
MODELO 3D HIBRIDO TC + DWI

Fusión VRT (TAC) y DWI



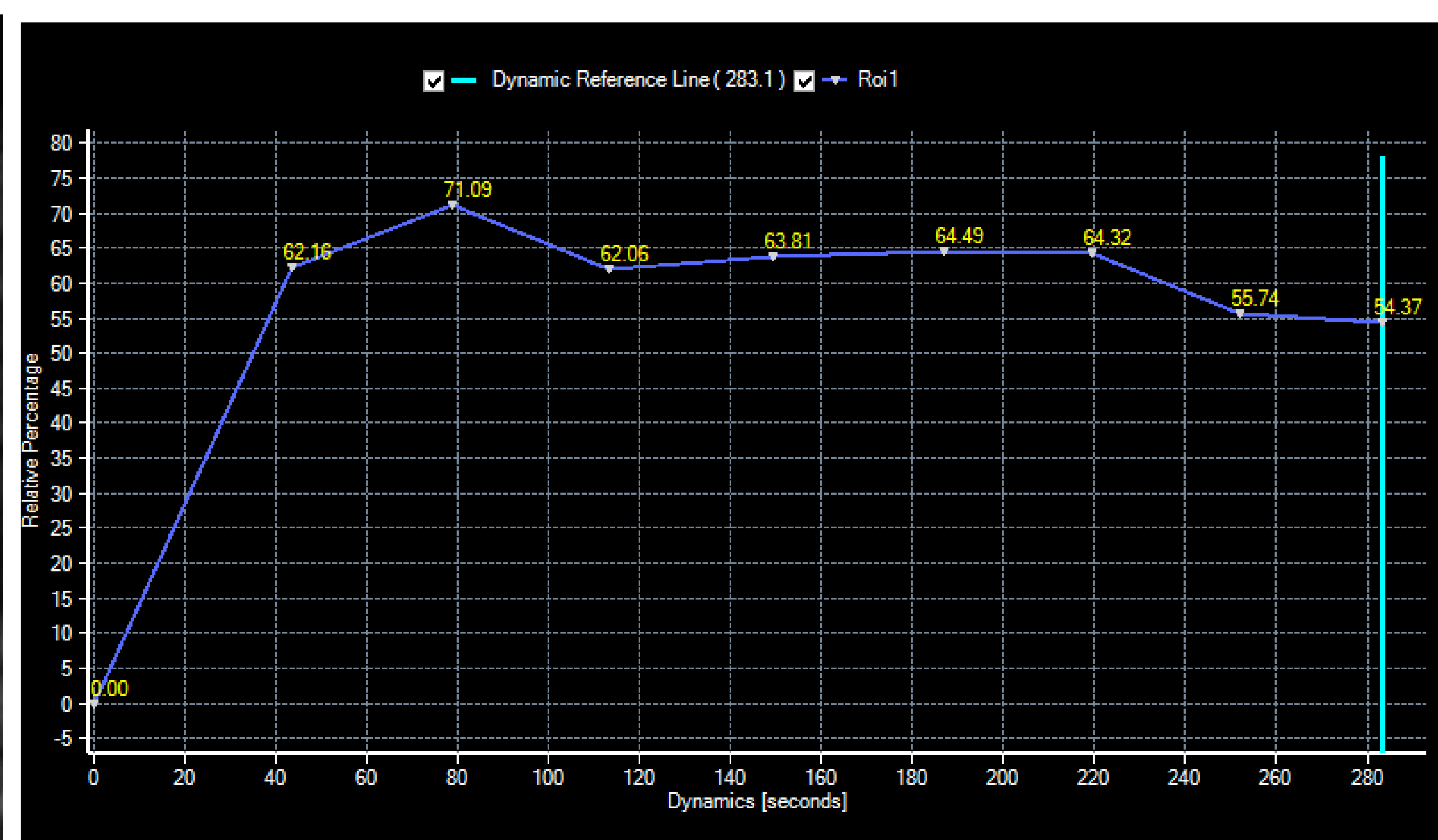
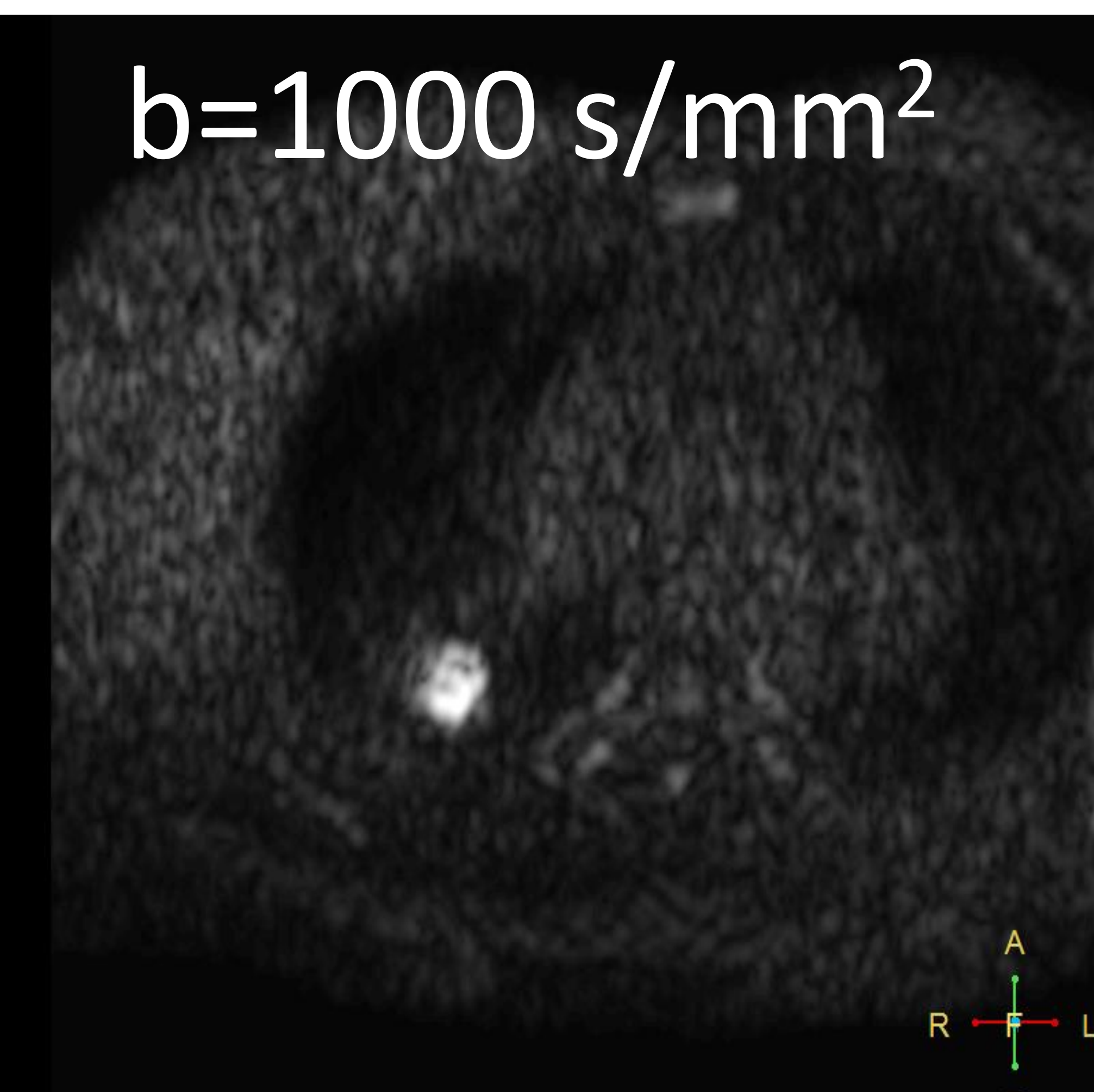
Modelo impreso con
Material Jetting.
Impresora Object 5500
Compuesto base acrílica



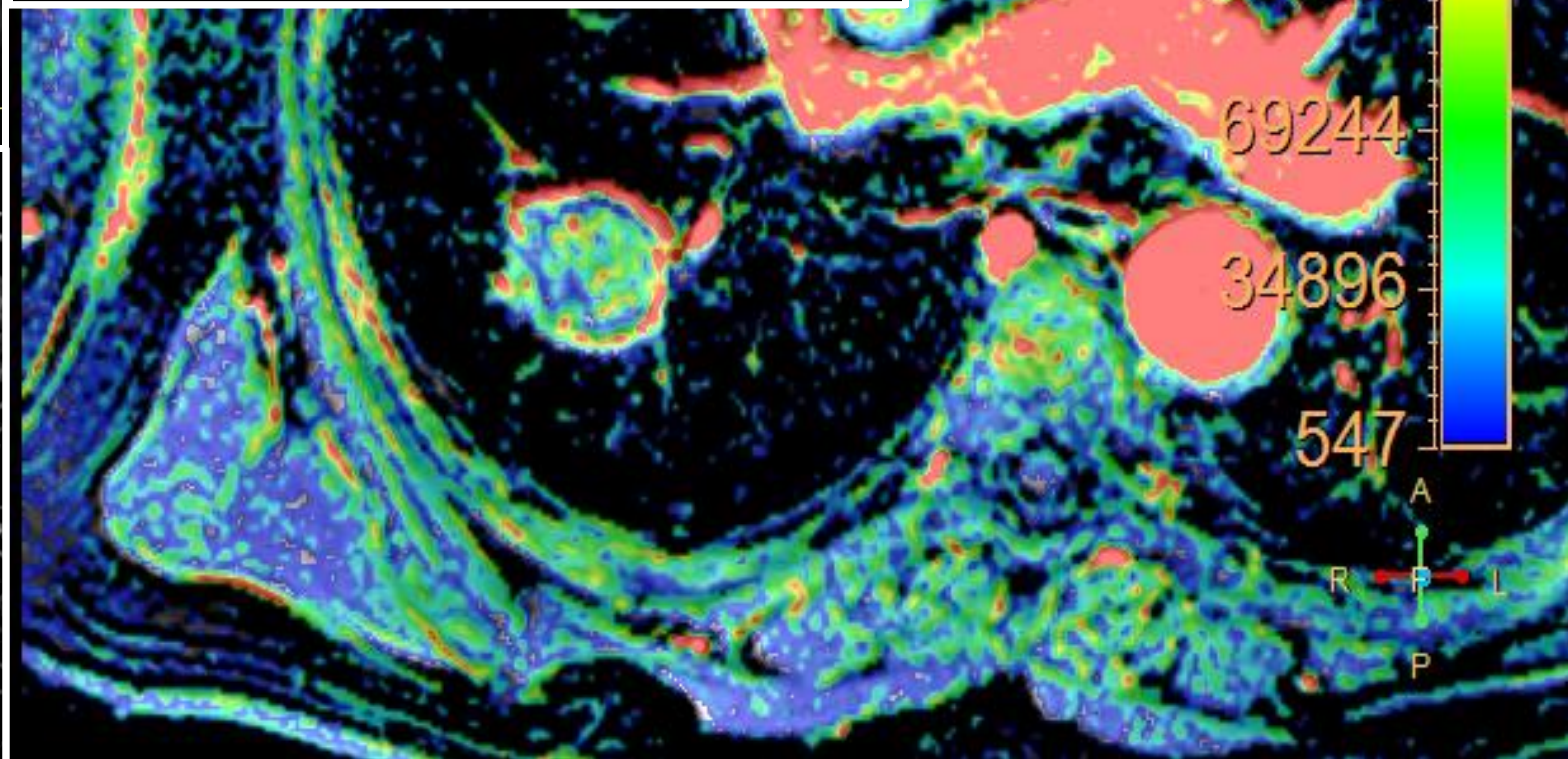


Correlación TC y DWI

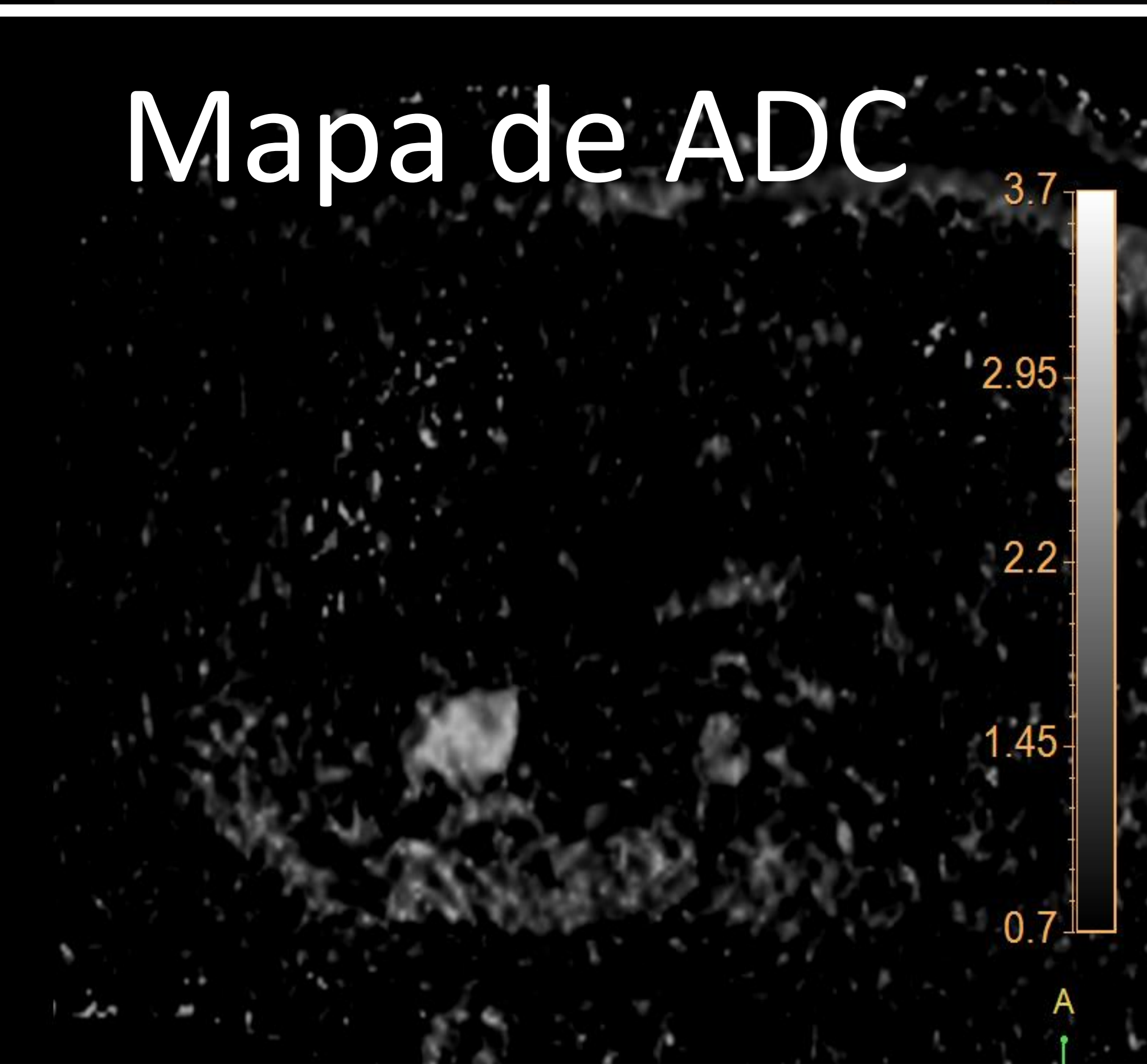
$b=1000 \text{ s/mm}^2$



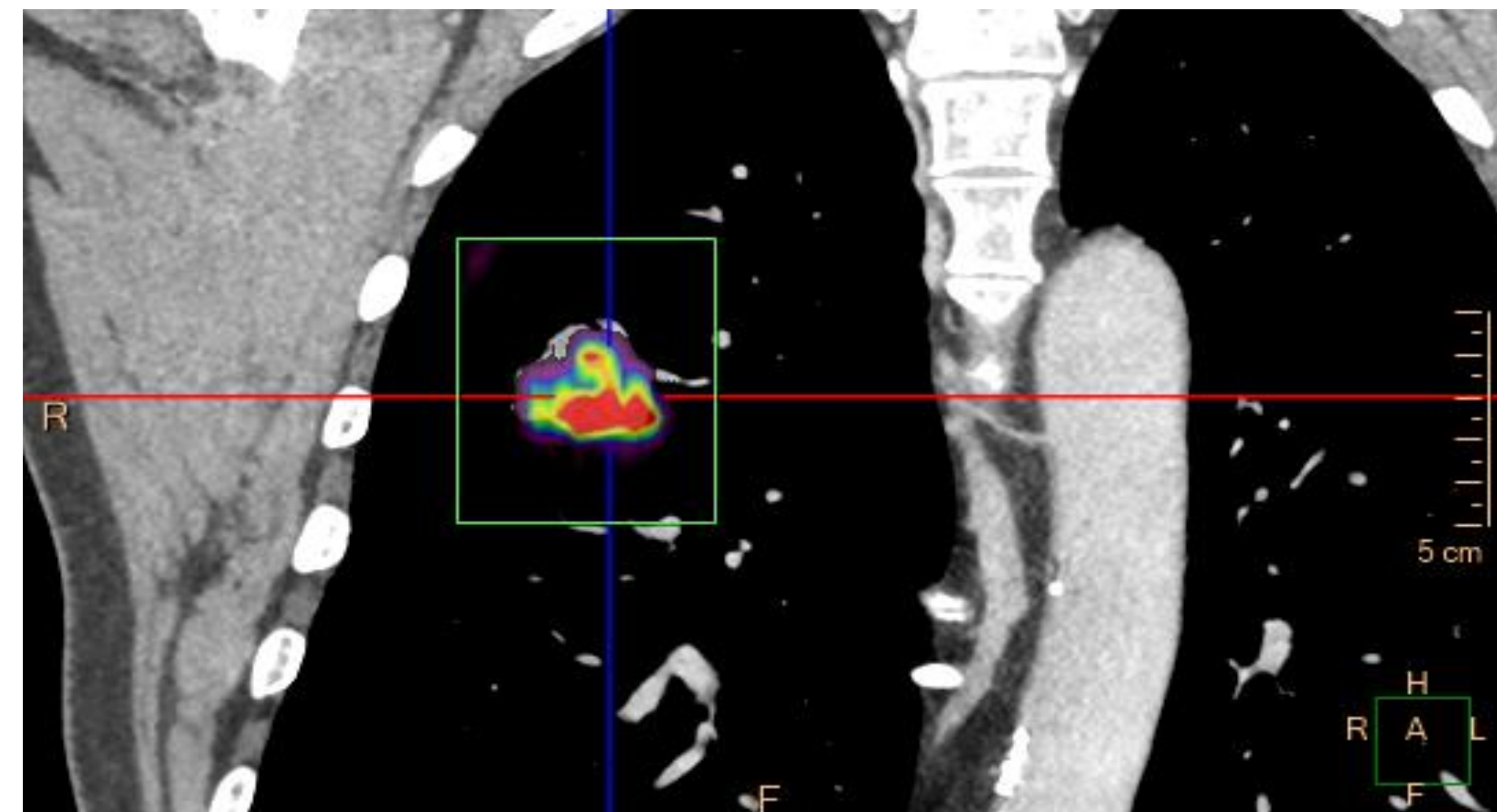
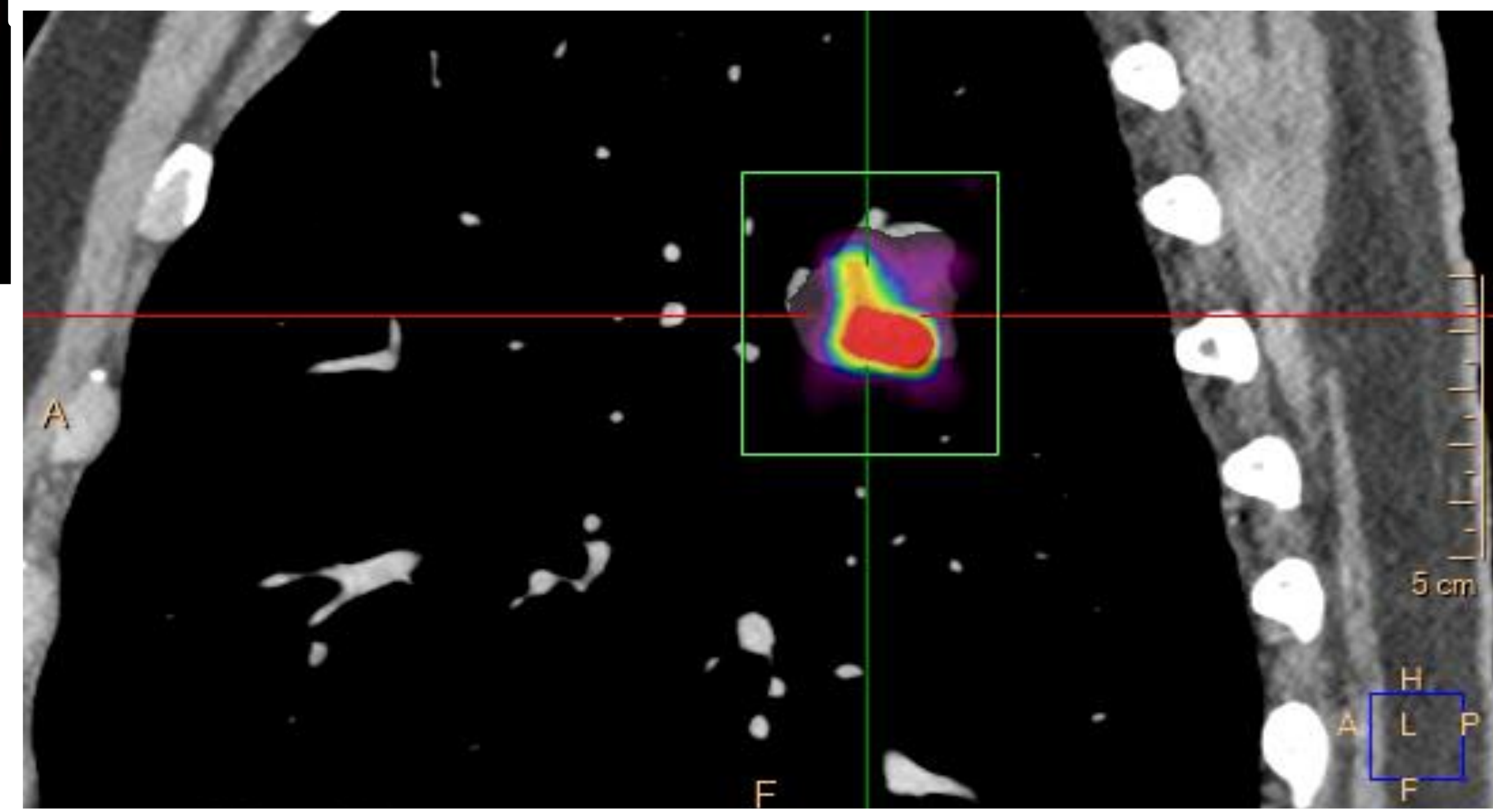
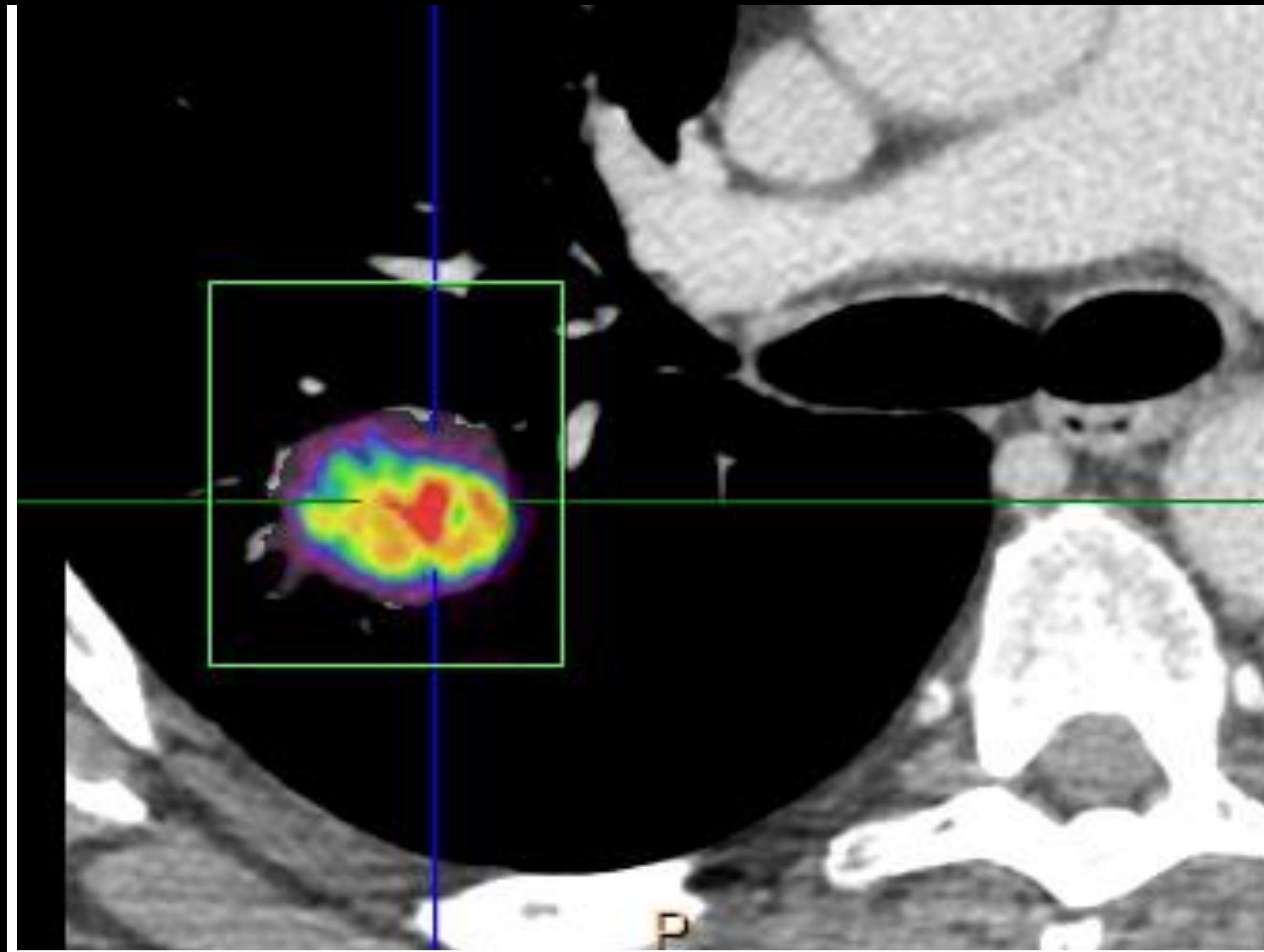
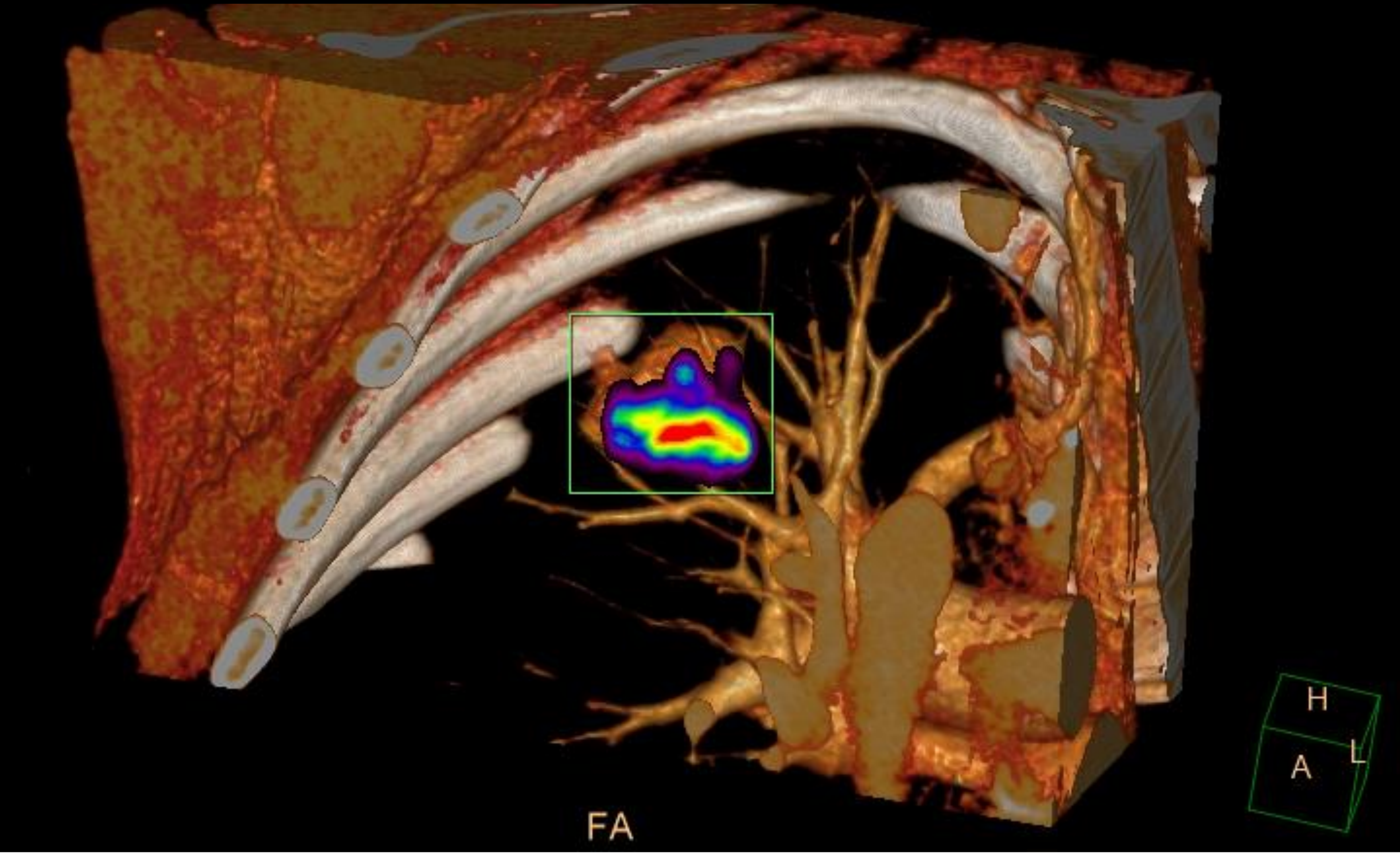
DCE - MR



Mapa de ADC



FUSIÓN TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA + DWI ($b=1000 \text{ s/mm}^2$)

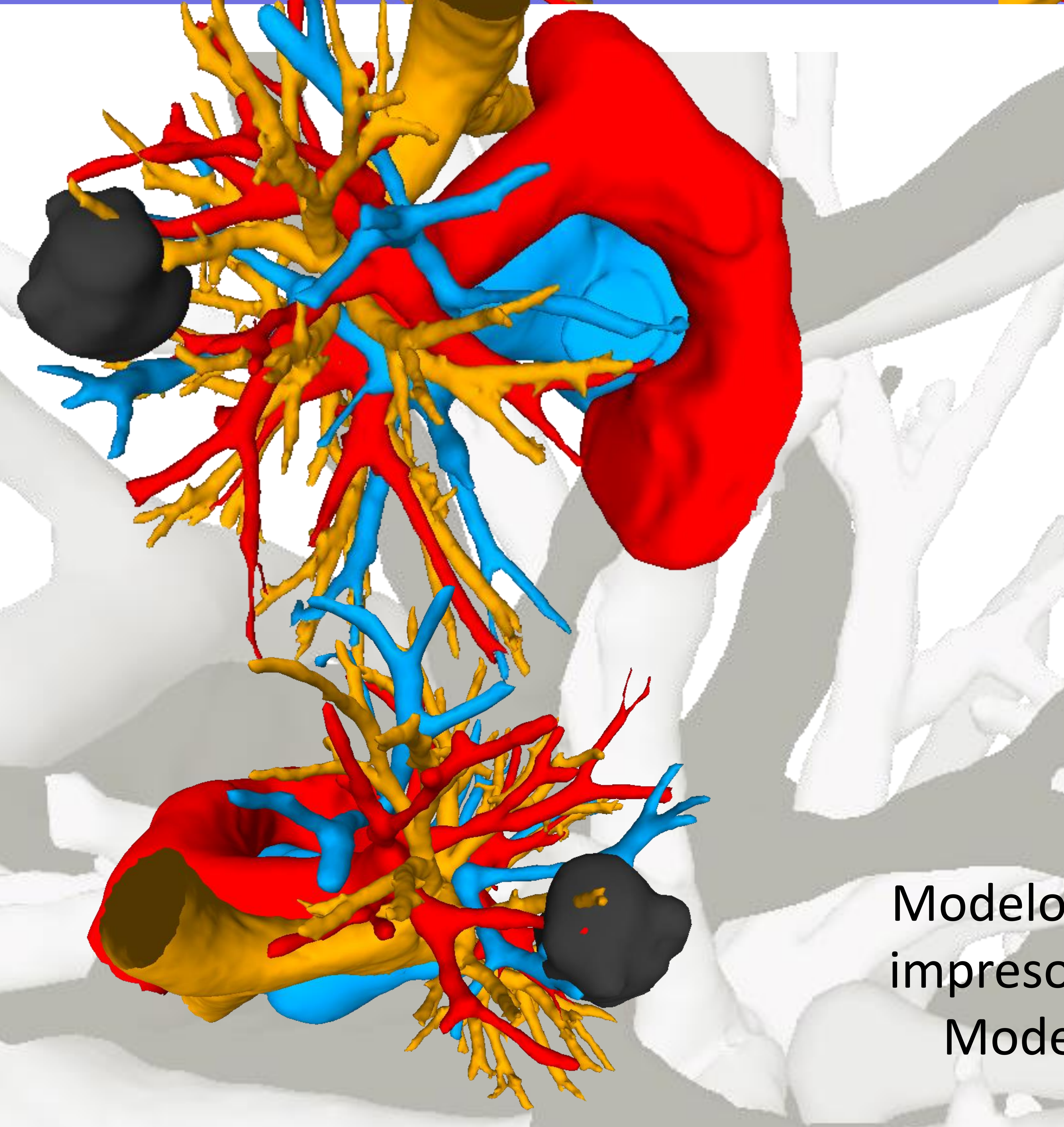
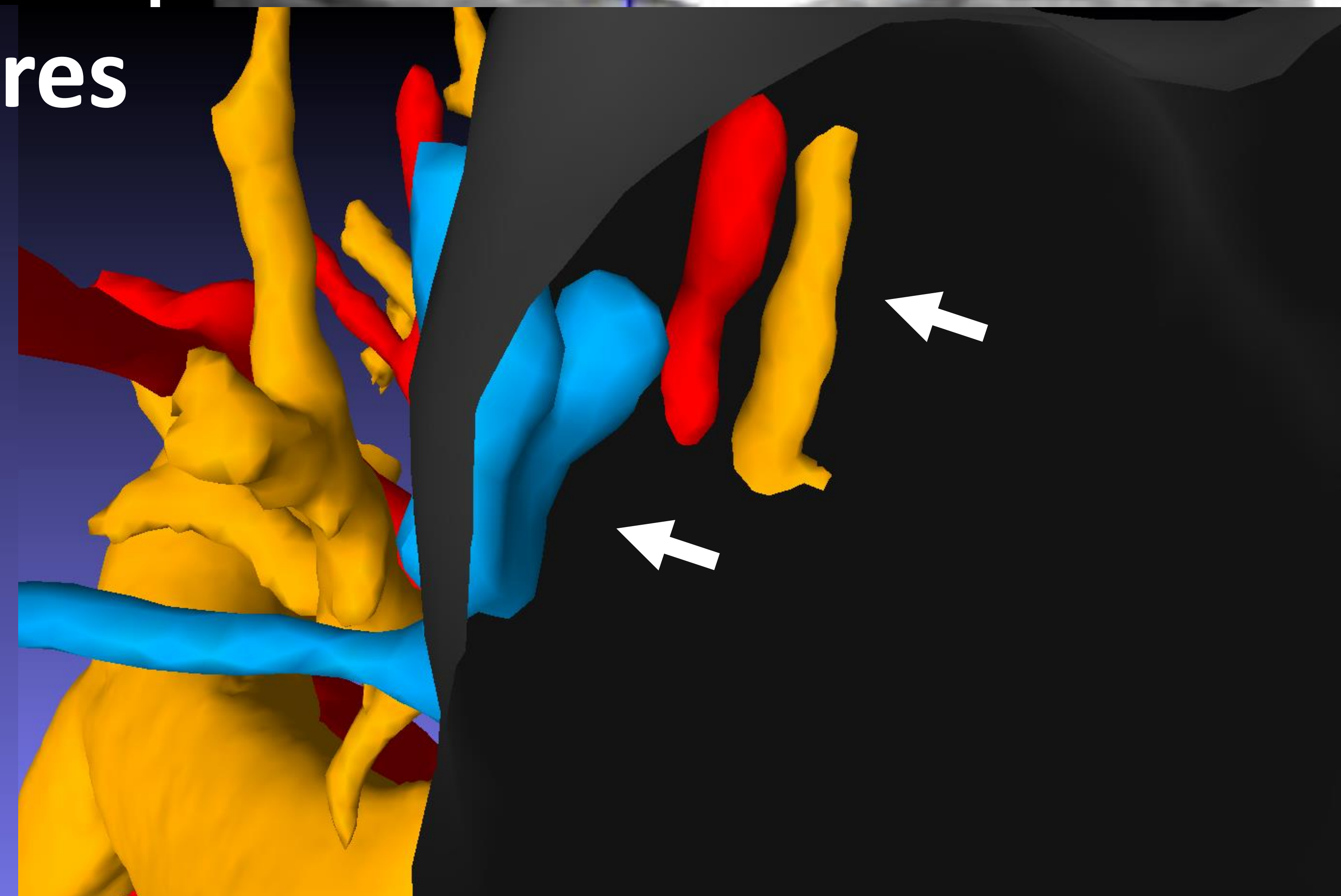
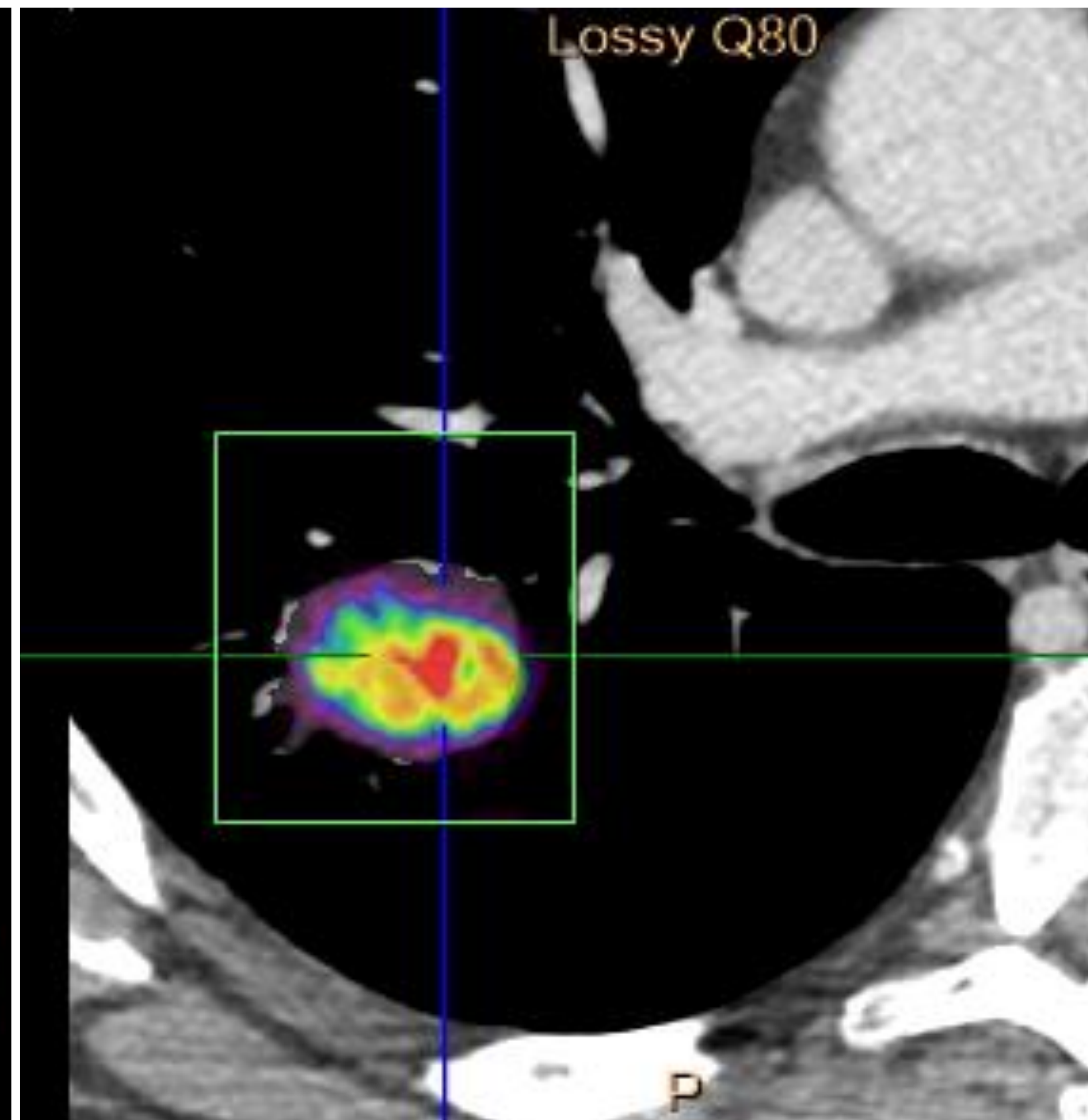
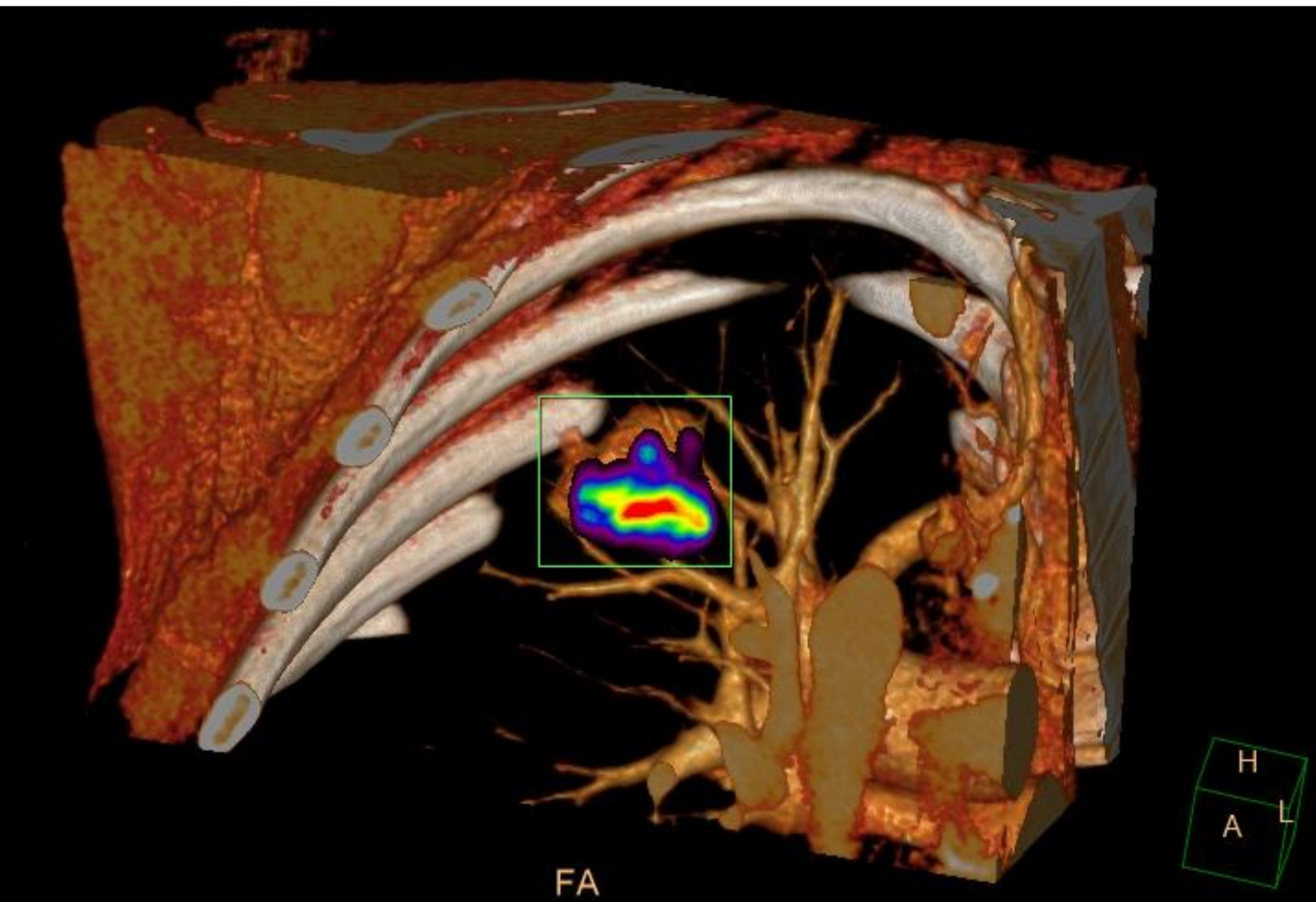


Paciente varón de 75 años con metástasis pulmonar de origen intestinal (antecedentes de neoplasia de colon).

Masa pulmonar de 35 x 30 mm en lóbulo superior derecho, localmente infiltrante.

DCE-MR con curva de captación tipo B.

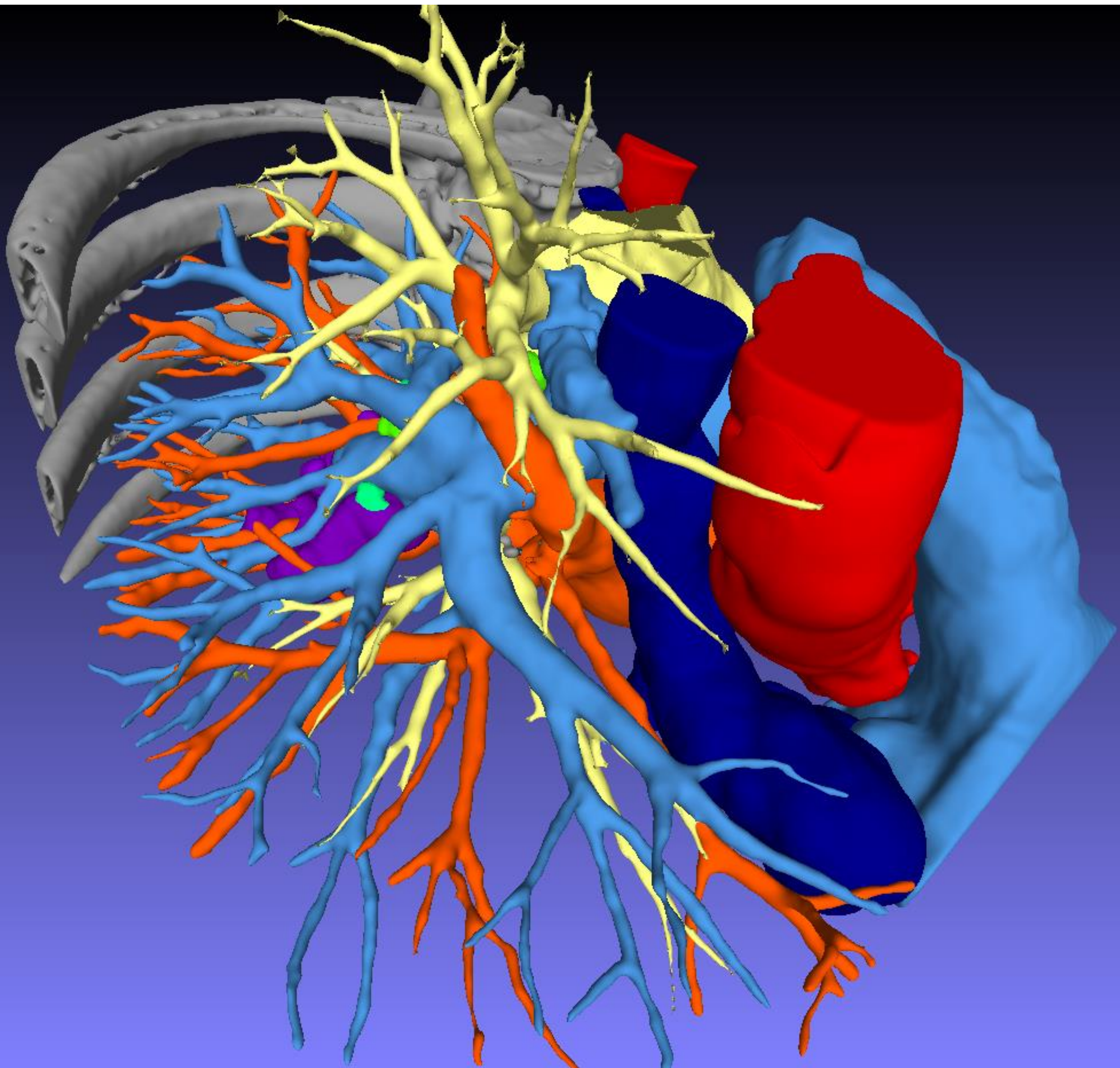
Restricción en difusión ($ADC_{\text{medio}}: 0,82 \pm 0,32 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$) indicando hiper celularidad.



Modelo obtenido con Binder Jetting en impresora ProJet 660 pro (3D systems).
Modelo monomaterial (composite) y policromático.

7 Conclusiones

Take home message



- *La impresión 3D constituye un método novedoso y potencialmente útil para la planificación del tratamiento quirúrgico y para la mejora del aprendizaje.*
- *A pesar de que el impacto clínico precisa ser comprobado, esta técnica potencialmente puede mejorar la planificación quirúrgica, especialmente en intervenciones complejas.*