



**Implementación de un modelo automatizado de volumetría corporal en riñones mediante algoritmos de segmentación utilizando imágenes de resonancia magnética**

Juan Manuel Agudelo Olarte

Trabajo de grado presentado para optar al título de Bioingeniero

Asesores

John Fredy Ochoa Gómez, Doctor (PhD) en Ingeniería Electrónica

Melissa Guerrero Sánchez, Bioingeniera

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Bioingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

---

Cita

(Agudelo Olarte, 2024)

---

**Referencia**

**Estilo APA 7 (2020)**

Agudelo Olarte, J. M. (2024). *Implementación de un modelo automatizado de volumetría corporal en riñones mediante algoritmos de segmentación utilizando imágenes de resonancia magnética* [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

---



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

Rector: John Jairo Arboleda Réspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: John Fredy Ochoa Gómez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

### **Dedicatoria**

Este trabajo va dedicado a mi mamá, la cual siempre ha creído en mí y estuvo apoyándome incondicionalmente en este proceso para lograr mis objetivos y sueños. Su fe en mis capacidades se volvieron la luz que guió mi camino. A mis abuelos por estar siempre pendientes y recordarme las raíces y el lugar de donde vengo, ya que sus valores han sido fundamentales para culminar esta etapa académica, ellos han sido esa voz que me vuelve a la realidad, también mis compañeros de la carrera que hoy puedo considerarlos amigos. Su amistad y apoyo fueron fundamentales en todo el proceso de la vida universitaria. Finalmente, este trabajo es tanto de suyo como mío, muchas gracias por el amor, la paciencia y la inspiración que entregaron generosamente en mi vida.

### **Agradecimientos**

Mi más sincero agradecimiento va dirigido a mi asesor interno de tesis, John Fredy Ochoa, por su entrega, apoyo y orientación a lo largo de este proceso. Su profundo conocimiento y experiencia han sido fundamentales para el correcto desarrollo de mi trabajo. De igual manera, agradezco infinitamente a mi asesora externa, Melissa Guerrero, por su paciencia, dedicación y compromiso. Su perspectiva y sabiduría han sido cruciales para superar las problemáticas presentadas durante todo este proyecto.

Deseo expresar mi gratitud a la Fundación Instituto Neurológico de Colombia por brindarme la oportunidad de utilizar sus herramientas con el fin de orientar el trabajo de grado hacia un enfoque real y significativo. Mi más sincero agradecimiento también a la Universidad de Antioquia, la cual me ha permitido crecer tanto académica como personalmente; hoy la considero mi segundo hogar, y así será siempre.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que estuvieron presentes durante esta travesía. Cada palabra de aliento y cada muestra de apoyo han dejado una huella en mi corazón. Jamás olvidaré la solidaridad y el calor humano que recibí de cada uno de ustedes.

**Tabla de contenido**

Resumen .....	9
Abstract .....	10
Introducción .....	11
Objetivos .....	14
Objetivo general .....	14
Objetivos específicos.....	14
Marco teórico .....	15
Resonancia magnética .....	15
Secuencias más usadas en adquisición de imágenes por resonancia magnética .....	17
Secuencia spin echo .....	17
Secuencia spin echo potenciada en T1.....	17
Secuencia spin echo potenciada en T2.....	17
Uropatía obstructiva .....	17
Uroresonancia funcional .....	18
Inteligencia artificial .....	19
Redes neuronales .....	19
MONAI .....	20
Segmentación de riñones.....	20
Metodología .....	22
Solicitud uso de estudios Fundación Instituto neurológico de Colombia (FINDEC) .....	22
Construcción base de datos .....	22
Selección de estudios a segmentar por procesos automatizados .....	22
Identificación de los pacientes .....	22
Clasificación de los pacientes .....	22

Reconstrucción de la base de datos.....	23
Implementación del software MONAI.....	23
Instalación .....	23
Pruebas de segmentación .....	23
Entrenamiento del modelo .....	23
Implementación del modelo .....	24
Comparación estudio realizado con el software actualizado .....	24
Resultados .....	24
Construcción de la base de datos.....	24
Documentación instalación y uso del software Monailabel .....	25
Comparación del software usado actualmente en el FINDEC con su versión actualizada.....	35
Discusión.....	39
Conclusiones .....	42
Referencias .....	44

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Clasificación de la base de datos con pacientes anonimizados .....	25
<b>Figura 2.</b> Variables de entorno en la ruta Path .....	26
<b>Figura 3.</b> Comandos de instalación elementos necesarios en Python .....	26
<b>Figura 4.</b> Comandos de instalación MONAI.....	26
<b>Figura 5.</b> Comando para ejecutar el servidor de MONAI con base de datos local .....	27
<b>Figura 6.</b> Datasets disponibles para descargar del repositorio online del servidor MONAILABEL y segmentación de estudio dentro del dataset Task10_colon.....	27
<b>Figura 7.</b> Instalación extensión MONAI en 3D Slicer.....	28
<b>Figura 8.</b> Cambiar al módulo de MONAIlabel en 3D Slicer y conectarse al servidor .....	28
<b>Figura 9.</b> Segmentación fallida estudio de TAC del FINDEC.....	28
<b>Figura 10.</b> Segmentación TAC estudio de TAC del FINDEC .....	29
<b>Figura 11.</b> Segmentación estudios de resonancia sin entrenamiento .....	30
<b>Figura 12.</b> Formato usado en el software MRIconvert para archivos DICOM a NifTI.....	30
<b>Figura 13.</b> Código para habilitar el modelo preentrenado al abrir la carpeta Deepedit con bloc de notas .....	31
<b>Figura 14.</b> Visualización del dataset local en 3D slicer usando el módulo de Monailabel.....	31
<b>Figura 15.</b> Segmentación manual riñón derecho.....	31
<b>Figura 16.</b> Menú herramienta Segment Editor.....	31
<b>Figura 17.</b> Segmentación total background y riñones, uso de la herramienta Grow from seeds ..	32
<b>Figura 18.</b> Menú entrenamiento del modelo para la red neuronal .....	33
<b>Figura 19.</b> Entrenamiento al 100% de RM usando MONAIlabel.....	34
<b>Figura 20.</b> Segmentación renal en resonancia magnética con el modelo entrenado .....	35
<b>Figura 21.</b> Segmentación renal, antiguo sistema (ubicación derecha) y sistema a implementar (ubicación izquierda).....	37

<b>Figura 22.</b> Tabla de resultados funcionalidad sistema renal, antiguo sistema (ubicación derecha) y sistema a implementar (ubicación izquierda).....	37
<b>Figura 23.</b> Grafica de curva de realce a través del tiempo, antiguo sistema (ubicación inferior) y sistema a implementar (ubicación superior).....	38
<b>Figura 24.</b> Gráfico de Patlak sistema renal, antiguo sistema (ubicación inferior) y sistema a implementar (ubicación superior) .....	39

**Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>fMRU</b>	Uroresonancia magnética funcional
<b>TAC-CT</b>	Tomografía
<b>RM-MR</b>	Resonancia magnética
<b>FINDEC</b>	Fundación instituto neurológico de Colombia
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia



## Resumen

Los estudios de uroresonancia funcional permiten identificar el correcto funcionamiento del sistema renal en pacientes, dicho proceso se analiza a través de segmentación de riñones, el cual consiste en identificar tiempos de cambio en tonalidades haciendo uso de un medio de contraste e implementando un adecuado protocolo de adquisición de imágenes que permita tener una secuencia que se desplace en cuatro dimensiones, de tal manera que se obtengan medidas de volumen por unidad de tiempo y picos de contraste por unidad de tiempo con el fin de analizar la capacidad y funcionalidad renal. Por tal razón, se realizan pruebas con diferentes software basados en inteligencia artificial que ayudan a encontrar estos resultados con el fin de automatizar procesos, con base en lo anterior se someten a pruebas con pacientes reales y anatómicamente diferentes creando una base de datos local de la fundación instituto neurológico de Colombia y realizando segmentación renal en dichos estudios, comparando los resultados obtenidos con la anatomía del paciente y el software implementado actualmente dentro de la institución para los estudios urofuncionales renales. Encontrado herramientas bastante útiles que realizan una buena segmentación, no obstante, requieren más información de este tipo de estudios para implementar un dataset más grande y evaluar de manera detallada si el comportamiento del modelo entrenado funciona mejor.

*Palabras clave:* Uroresonancia funcional renal, sistema renal, inteligencia artificial, automatización, segmentación de órganos, dataset, medio de contraste

### **Abstract**

Functional uroresonance studies allow the identification of the correct functioning of the renal system in patients. This process is analyzed through kidney segmentation, which involves identifying changes in tonalities using a contrast medium and implementing an adequate image acquisition protocol. This protocol enables a four-dimensional sequence, allowing for measurements of volume and contrast peaks per unit of time, which are essential for analyzing renal capacity and functionality. Consequently, tests are performed with various artificial intelligence-based software to automate these processes. These tests are conducted with real and anatomically diverse patients, creating a local database at the Neurological Institute Foundation of Colombia. Renal segmentation is performed in these studies, and the results are compared with the patients anatomy and the software currently implemented in the institution for renal urofunctional studies. While useful tools have been found that perform good segmentation, they require more information from this type of study to create a larger dataset and to evaluate in detail whether the behavior of the trained model improves.

*Keywords:* Renal functional uro-resonance, renal system, artificial intelligence, automation, organ segmentation, dataset, contrast medium.

## Introducción

Actualmente el uso de la tecnología viene impactando la industria a nivel mundial, cada vez es más importante que las empresas tengan automatizados procesos a través de inteligencia artificial, por ello es importante dentro del área médica que dichas herramientas estén presentes en posprocesamiento de imágenes. El reconocimiento automático de imágenes es una de las principales ayudas para los profesionales médicos, ya que cada vez son más confiables los métodos usados que los manuales. [1]

Los métodos de segmentación de imágenes consisten en identificar corte por corte una estructura adquirida por el dispositivo medico durante el examen realizado, es decir, dicho proceso se programa a través de inteligencia artificial donde este algoritmo se programa para identificar un órgano de interés, el proceso de adquisición de imágenes en un resonador magnético es realizando cortes a través del tiempo y la unión de dichos capturas generan la reconstrucción volumétrica de las estructuras internas de los pacientes. El algoritmo de inteligencia artificial que reconoce el órgano a estudiar lo hace a través de un sistema o protocolo conocido dentro del mundo de la programación como redes neuronales artificiales o redes neuronales simuladas, se conocen con dicho nombre, ya que su estructura está inspirada en el cerebro humano y estas imitan la forma en la que las neuronas biológicas se comunican entre sí. Las redes neuronales artificiales están formadas por capas y cada capa tiene diferentes nodos, dichos nodos son puntos de posible unión o comunicación entre los procesos internos que tienen programados, sin embargo, estos nodos poseen una capa de entrada, una capa oculta y otra etapa de salida. Cada nodo es conocido como neurona artificial y se conectan entre sí, dicho proceso siempre sigue una secuencia lineal que va desde un estímulo o proceso de entrada hacia la salida, recorriendo diferentes nodos dentro de la red neuronal artificial, no obstante, para que se pueda avanzar dentro de las capas neuronales, se debe superar un valor de umbral, si esto no sucede, no existe comunicación dentro de la red y el algoritmo no envía la información en la secuencia indicada para generar una salida. Por ello para que se pueda dar una correcta reconstrucción volumétrica, las capas de nodos se entrenan a través la programación del código interno que estas poseen para que puedan avanzar a la siguiente etapa, siempre y cuando se cumpla la condición mencionada anteriormente. [2]

Dentro de la fundación Instituto Neurológico de Colombia se realizan uorresonancias funcionales a pacientes con alguna anomalía renal, con el fin de identificar el funcionamiento del

sistema urinario. Primero se usa un medio de contraste que permita observar todo el proceso de eliminación dentro del sistema renal, el primer tiempo que se toma es cuando la arteria aorta toma el color del contraste, luego cuando los riñones se llenan con la orina que está impregnada con el medio de contraste, posteriormente como viaja el líquido a la vejiga para que finalmente salga por la uretra. Todo este proceso se identifica a través de un software de visor de imágenes radiológicas cuando ya se tienen las imágenes procesadas por el resonador, los tiempos son identificados en los cortes requeridos y se extraen de estos los valores importantes, dichos datos son el cambio de color de la arteria y la tonalidad que adquieren los riñones con el medio de contraste, los envía al bioingeniero del instituto para que este haga uso de un software de libre uso conocido como Chop fMRU, dicho software permite segmentar los riñones y realizar una reconstrucción volumétrica de los tiempos analizados, sin embargo, para que el estudio sea confiable se debe realizar la segmentación renal corte por corte, esto debido a que es un proceso manual. Cuando ya se tiene la segmentación completa el software arroja la información necesaria para que el médico pueda tomar una decisión respecto al tratamiento del paciente. Sin embargo, el posprocesamiento toma tiempo ya que se debe realizar de manera detallada y el tiempo es valioso para tomar decisiones rápidas cuando se trata de la salud de los pacientes. Por dicho motivo se ha revisado la literatura con el propósito de hacer uso de la tecnología y promover nuevas estrategias para realizar el posprocesamiento de dichos estudios, como lo es el uso de algoritmos de inteligencia artificial para la segmentación de riñones, además de la posibilidad de unificar herramientas de libre uso con el desarrollo de un aplicativo web.

Este estudio, está enfocado en implementar un modelo automatizado del volumen de los riñones para la segmentación en imágenes de resonancia magnética, dicho proceso se realiza a través de la documentación encontrada en el software de libre uso MONAILABEL a través de la interfaz de visualización 3D slicer. Para lograr la segmentación de los órganos de interés que en este caso son los riñones, se entrena el modelo preestablecido por el software, ya que este segmenta imágenes de tomografía (TAC), las cuales difieren en dimensiones espaciales con las de resonancia, a pesar de que sean archivos tipo DICOM, se documenta todo el proceso para la descarga e instalación del software, además de la utilidad de las herramientas que este posee y la forma en la cual se puede acceder al código y modificarlo, además de realizar todo el entrenamiento de los estudios de imagenología usados, los cuales fueron suministrados por la Fundación Instituto Neurológico de Colombia, se esta manera se hace uso de imágenes de pacientes de uroresonancia

funcional que se tienen almacenados dentro de la base de datos de la institución proveedora de servicios, a pesar de esto, es importante aclarar que dentro de dicho repositorio hay diferentes pacientes, los cuales algunos no poseen los riñones anatómicamente normales, es decir, algunos pueden ser más pequeños o más grandes que el rango normal establecido por la literatura, además de que también se encuentran pacientes con los riñones espacialmente fuera del rango normal de ubicación. [3]

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Implementar un modelo automatizado del volumen de los riñones mediante el uso de algoritmos de segmentación en imágenes de resonancia magnética.

### **Objetivos específicos**

1. Construir una base de datos con toda la descripción demográfica, características de adquisición, descripciones de las patologías de los pacientes que podrían ser beneficiados con este tipo de estudios.

2. Documentar la instalación del software de libre uso implementado para la segmentación de riñones, explicando las herramientas que se usaron para generar el modelo a entrenar usando la base de datos establecida previamente y mencionando los requerimientos que sean necesarios para un correcto funcionamiento para obtener una segmentación automatizada.

3. Comparar la segmentación de los riñones obtenidos del modelo del software más actual (chopfMRU) con el método usado dentro de la institución.

## Marco teórico

### Resonancia magnética

La resonancia magnética (RM) es un método de adquisición de imágenes muy relevante dentro de la medicina actualmente, esto se debe a la poca intervención médica que requiere la preparación de los pacientes para dichos estudios, también al alto contraste que se tienen de los tejidos del organismo, lo cual da como resultado imágenes con mejor resolución e información más detallada, es decir, se puede diferenciar claramente la anatomía de los órganos, identificar posibles patologías y determinar la funcionalidad de algunos órganos. Las características más relevantes de este proceso es que no es invasiva y no utiliza radiación ionizante, lo que genera un menor riesgo de exposición en los pacientes y disminución de sufrir algún evento adverso dentro de las instituciones prestadoras de servicios IPS. [4]

La materia se encuentra compuesta por átomos, dichas estructuras a su vez poseen un núcleo, el cual internamente se compone por protones y neutrones y alrededor de dicho núcleo se encuentra una capa de electrones, los átomos pueden tener carga positiva, negativa o neutra y esta depende de la cantidad de electrones que posean, si los electrones del átomo son impares su carga es positiva, ya que los protones presentes en el núcleo son mayores que los electrones de la corteza o capa externa. Los protones se encuentran en constante movimiento girando sobre su eje, a dicha rotación se le conoce como peonza o spin. Cuando los átomos están cargados positivamente el movimiento de los protones genera una corriente eléctrica, por la ley de inducción de Faraday dicha corriente produce un campo magnético y el protón podría considerarse en ese instante como un pequeño imán. [5]

El cuerpo humano también está compuesto por átomos y el más abundante dentro del organismo es el hidrogeno, donde este también cuenta con la propiedad de spin, no obstante, dicho movimiento se encuentra aleatoriamente dentro de todo el organismo, generando que las carga neta del campo sea cero, es decir, los movimientos de spin se cancelan entre si y por ello el cuerpo no cuenta con magnetización, sin embargo, cuando un tejido dentro del cuerpo es sometido a un campo magnético externo los protones que encuentran internamente en el núcleo de los átomos, se alinean a dicha fuerza externa, generando una alineación la cual puede ser paralela al campo o antiparalela a este, donde el gasto energético de la segunda alineación es mayor que la primera.

Cuando los protones se encuentran alineados al campo magnético, estos comienzan a moverse alrededor del eje de este, generando nuevamente un movimiento de precesión, sin embargo, esta vez de manera ordenada ya que están moviéndose en la dirección de un mismo eje. El movimiento se le conoce como precesión y su frecuencia es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético, la frecuencia de precesión ( $\omega$ ) está determinada por la ecuación de LARMOR, donde  $B_0$  se conoce como la intensidad del campo magnético al cual está sometido el paciente y  $\gamma$  es la constante giromagnética que depende del elemento que este siendo sometido al campo.

$$\omega \text{ [Hz/MHz]} = \gamma B_0 \text{ [T]} \quad \text{Ecuación 1. [6]}$$

El objetivo de someter a un paciente a un campo magnético externo es generar la alineación de los átomos y así obtener una magnetización neta diferente de cero, de esta manera es que los resonadores operan, sin embargo, para obtener el contraste de los tejidos es necesario hacer uso de pulsos de ondas electromagnéticas, los cuales son conocidos como pulsos de radiofrecuencia, dichos pulsos deben tener la misma frecuencia que la de precesión, ya que de esta manera pueden interactuar con los protones aumentando su energía haciendo que cambien del estado paralelo al antiparalelo, de esta manera disminuyendo la magnetización longitudinal del campo, lo cual implica que los protones entren en sincronismo en la nueva dirección la cual es transversal al campo magnético establecido por el resonador, dicha magnetización transversal puede ser medida y es la que tiene la información del contraste de los tejidos. Los pulsos de radiofrecuencia son ondas que van directamente al vector de magnetización y estas poseen un ángulo, los ángulos más usados para las radiofrecuencias son de 90 y 180 grados, se denominan de esa forma porque al interactuar con el campo generan un nuevo vector de magnetización transversal que se ubica a 90 o 180 grados del vector magnetización longitudinal inicial, como se mencionó anteriormente lo más importante del vector magnetización es identificar la información del contraste en los tejidos, estos se genera por la interrupción de la onda de radiofrecuencia, ya que los protones pierden energía y la sinergia de fase con el campo magnético longitudinal, por este motivo liberan energía en forma de corriente eléctrica la cual recibe el nombre de eco, esta señal es interceptada y usada como información por una antena que posee el resonador la cual permite cuantificar el tiempo de duración de la magnetización transversal, la cual se conoce como T2 o tiempo de relación transversal, también es posible conocer el tiempo en el que se reestablece la magnetización longitudinal, dicho tiempo se conoce como T1 o tiempo de relajación longitudinal, finalmente el tiempo que transcurre entre el



estímulo generado por la onda de radiofrecuencia y la recepción de la señal de eco se le conoce como TE o tiempo de eco. [4]

### **Secuencias más usadas en adquisición de imágenes por resonancia magnética**

#### ***Secuencia spin echo***

Es una secuencia que consiste en enviar radiofrecuencias de 90 y 180 grados cíclica, cuando transcurre el doble de tiempo en el que se han enviado ambos pulsos se recibe la señal de eco que proviene del tejido de interés que está siendo sometido al campo magnético y así se obtiene la información molecular.

#### ***Secuencia spin echo potenciada en T1***

Esta secuencia se obtiene a través de tiempos de repetición y de eco cortos, ya que cuando se tienen tiempos de eco cortos la relajación transversal del campo es más rápida, por ello se pueden captar diferentes intensidades en la señal dependiendo del tipo de tejido que sea, por ejemplo la grasa posee tiempos de relajación cortos, por ello en las imágenes que usan esta secuencia se verá con mayor intensidad, mientras que estructuras como el agua que poseen tiempos de relajación más prolongados no se verán con tanta intensidad usando dicha técnica.

#### ***Secuencia spin echo potenciada en T2***

La secuencia de eco potenciada en T2 es el opuesto a la potenciada en T1, ya que en esta técnica se emplean tiempos de repetición y tiempos de eco largos, por lo tanto, la relajación transversal del campo es más lenta. Esta secuencia deja ver la grasa como una señal de baja intensidad y, el agua, como una señal de alta intensidad.

### **Uropatía obstructiva**

La uropatía obstructiva es la interrupción estructural o funcional del flujo normal de la orina, la cual afecta 5 de cada 1.000 personas a nivel mundial. La interrupción a veces conduce a una disfunción renal conocida como nefropatía obstructiva. Usualmente esta anomalía se presenta en pacientes recién nacidos, debida a alguna mal formación en el sistema renal. Al ser una patología que impide ya sea por un obstáculo o un problema funcional el correcto flujo de la orina por todo el sistema renal, a la larga se termina generando dificultad para orinar y si es una problemática que

no es tratada a tiempo compromete toda la función renal generando insuficiencia, por tal motivo es muy importante tratar dicha anomalía de manera oportuna con el fin de mantener el correcto funcionamiento del organismo. [7]

### **Uroresonancia funcional**

La uroresonancia funcional consiste en usar un medio de contraste para identificar de manera detallada todo el correcto funcionamiento del sistema renal, ya que este permite ver durante los órganos en diferentes cortes adquiridos en toda la secuencia implementada por cada institución hasta que se dé la reconstrucción renal. Dentro de la fundación instituto neurológico de Colombia, se sigue un protocolo de adquisición para este tipo de estudios basado en el software ChopfMRU el cual posee una documentación de cómo debe realizarse un estudio urofuncional, por ello se delimita el uso del contraste antes y después de iniciar la secuencia de adquisición relevante para este tipo de estudios, dicha secuencia tiene una duración de 15 minutos. Este tiempo tarda un paciente en estar en reposo dentro del resonador mientras se genera todo el proceso de eliminación de la orina, sin embargo, existen tres etapas principales. La primera es de quietud para identificar el tamaño y posición de los órganos, posterior a esto sigue la fase de contraste en la cual se observan mejor las estructuras de interés y se puede analizar el correcto funcionamiento de los riñones, ya que al llegar a la fase final la cual es la de micción se puede identificar que tanto retiene el paciente el líquido y el tamaño de los riñones al estar contrastados completamente. No obstante, lo realmente relevante para el campo de ingeniería son las curvas renales que se obtienen al realizar la segmentación de los riñones, para hacer esto se debe conocer los tiempos de interés dentro de la secuencia adquirida y para esto se hace uso de un visor de imágenes radiológicas, el primer tiempo relevante es cuando se contrasta la arteria aorta ahí va el tiempo de partida. Posterior a este se da el primer cambio de tono en grises de los calices renales, esto indica que comienza el trabajo de retener la orina y finalmente el tiempo final es cuando la orina se dirige a través del uréter a la vejiga y se retiene en esta zona para que finalmente salga por la uretra. [8]

Actualmente la uroresonancia magnética funcional ha estado tomando más relevancia como procedimiento, ya que se puede diagnosticar correctamente pacientes que padezcan uropatía obstructiva, ya que es una buena alternativa para evaluar las curvas de drenaje que poseen los riñones al depurar la orina a través de la vejiga, es decir, cuando la orina realiza todo el proceso de micción, el detalle más importante que posee este estudio se debe al contraste que genera en los tejidos, con base en el tipo de secuencias usadas para la adquisición de imágenes se pueden

contrastar los órganos o tejidos blandos de interés, con el fin de tener mejor resolución de estos y dar un diagnóstico más adecuado al observar la estructura completa realizando su función por todo el sistema renal, además de que el paciente no es sometido a radiación ionizante, lo cual implica un cuidado de la integridad de los pacientes, que en su gran mayoría son niños. Las uroresonancias funcionales o las resonancias en general requieren mucha quietud de los pacientes, ya que se están tomando cortes a través del tiempo de todo el cuerpo, por tal motivo el movimiento ocasiona que la superposición de los cortes se encuentren desplazados en la reconstrucción volumétrica y no se detallan de manera correcta las estructuras internas del organismo, por esto a manera de protocolo y con el fin de agilizar la adquisición de las imágenes, los pacientes son puestos bajo anestesia. [9]

### **Inteligencia artificial**

La inteligencia artificial (IA) es una rama de la informática la cual tiene como objetivo desarrollar programas que sean capaces de realizar o emular actividades hechas por inteligencia humana, es decir, las máquinas puedan analizar todo el entorno y con base en la experiencia y entrenamiento que tengan tomar la decisión más adecuada ante una posible problemática, básicamente se conoce como un aprendizaje automático profundo supervisado, sin embargo, carece de una definición universalmente aceptada, ya que se conoce su, a pesar de esto no se define su concepto como tal por la amplia variedad de aplicaciones que posee. [10]

#### ***Redes neuronales***

Las redes neuronales artificiales son un algoritmo inspirado en la estructura y función del cerebro humano, a través del reconocimiento o categorización de imágenes jerarquizadas de los datos distribuidos en múltiples capas compuestas de módulos simples y no lineales, realizando de esta manera la transformación de los datos para su discriminación. Es decir, son estructuras que están formadas por capas y cada capa tiene diferentes nodos, dichos nodos son puntos de posible unión o comunicación entre los procesos internos que tienen programados, sin embargo, estos nodos poseen una capa de entrada, una capa oculta y otra etapa de salida. Cada nodo es conocido como neurona artificial y se conectan entre sí, dicho proceso siempre sigue una secuencia lineal que va desde un estímulo o proceso de entrada hacia la salida, recorriendo diferentes nodos dentro de la red neuronal artificial, no obstante, para que se pueda avanzar dentro de las capas

neuronales, se debe superar un valor de umbral, si esto no sucede, no existe comunicación dentro de la red y el algoritmo no envía la información en la secuencia indicada para generar una salida. Por ello para que se pueda dar una correcta reconstrucción volumétrica, las capas de nodos se entrenan a través la programación del código interno que estas poseen para que puedan avanzar a la siguiente etapa, siempre y cuando se cumpla el valor mínimo del umbral. [11]

## **MONAI**

MONAI (Medical Open Network for AI), es un software de libre acceso creado por NVIDIA y King College London, donde el propósito de estos fue implementar una herramienta que pudiera crear una comunidad de desarrolladores interesados en el área de inteligencia artificial con imágenes diagnosticas. MONAI, es una herramienta que hace uso de varios frameworks con el fin de acelerar los procesos de investigación en clínicas a través del deeplearning, principalmente el entorno de trabajo a usar de MONAI es el label, el cual permite entrenar un modelo para una tarea en específico y mantenerlo constantemente actualizado usando una base de datos con imágenes de interés. MONAI label ofrece actualmente dos aproximaciones que consisten en dos modelos de deeplearning, las cuales son deepGrow, deepEdit y automatic segmentation, las dos primeras hacen referencia a un proceso más manual, donde se identifican los volúmenes de los órganos a través de regiones de interés haciendo clic alrededor de la estructura a enfocar, este método se le conoce como scribbles y se limita a encerrar el área por cada segmento del volumen de los órganos, mientras que la última aproximación es el enfoque de este proyecto, ya que su funcionamiento es a través de DynUnet y PyTorch, siendo Pytorch el entorno de trabajo y DynUnet es una arquitectura de redes neuronales basada en U-net, la principal característica de DynUnet es su capacidad de adaptarse a entradas de distintos tamaños sin tener que redimensionar la estructura previamente, por tal motivo es una herramienta de interés en la segmentación de imágenes médicas. [12]

## **Segmentación de riñones**

El uso de la arquitectura de redes neuronales artificiales UNet ha permitido avanzar progresivamente en la segmentación volumétrica en riñones en resonancias magnéticas con contraste dinámico, esto se debe principalmente a que el algoritmo usado para dicho reconocimiento se está entrenando constantemente, sin embargo, este debe de ajustarse al protocolo

que se usó para la adquisición de las imágenes y también debe tener en cuenta el valor del campo magnético usado por el resonador. Se ha encontrado que la similitud de la segmentación del riñón a través de modelos automáticos comparado con el manual según el coeficiente de similaridad Dice está por encima del 90%, donde este valor depende directamente de las modificaciones en el entrenamiento de las redes neuronales tomadas de la arquitectura Unet. [13]

Es importante identificar que el algoritmo depende mucho del tipo de paciente que deba segmentar, ya que no todos los riñones son iguales. Por tal motivo cabe resaltar que el entrenamiento de la red neuronal debe ser tanto de sujetos con órganos estructuralmente sanos como pacientes con alguna anomalía morfológica renal, ya que es acá donde probablemente el coeficiente de similaridad de Dice varíe respecto al proceso manual, por tal motivo se deben hacer pruebas suficientes para llegar a un modelo real e ideal de la reconstrucción volumétrica de los riñones.

## Metodología

### **Solicitud uso de estudios Fundación Instituto neurológico de Colombia (FINDEC)**

Al realizar un estudio que requiere información de la institución se requiere solicitar un aval para hacer uso de esta, por ello el primer paso es verificar con el comité de investigación o el área encargada de dichos asuntos dentro de la fundación instituto neurológico de Colombia la viabilidad de acceder a la información con fines académicos y respetando la integridad de la institución y los pacientes usados para realizar la investigación.

### **Construcción base de datos**

#### *Selección de estudios a segmentar por procesos automatizados*

Dentro del instituto uno de los estudios más relevantes y que requiere identificar los riñones, es decir, hacer una reconstrucción volumétrica de ellos son las urofuncoinales renales, dónde este proceso identifica la funcionalidad de los riñones a través del realce en el color de los órganos debido al medio de contraste que se le suministra a los pacientes, por ello se obtiene una secuencia de muchos cortes de difusión temporal, ya que es una secuencia rápida que constantemente está haciendo cortes transversales de los órganos de interés. Por lo expuesto anteriormente se decidió construir la base de datos con este tipo de estudios, además de que se busca implementar una alternativa a la segmentación actual empleada en la fundación instituto neurológico de Colombia.

#### *Identificación de los pacientes*

Dentro del FINDEC se encuentran 11 estudios de uroresonancia funcional, los cuales serán usados para entrenar el algoritmo de segmentación renal usado por el software MONAI. Sin embargo, al ser información de los usuarios se anonimizarán los datos de estos y no se hará énfasis en las patologías, género o edad, con el fin de proteger la información de los usuarios.

#### *Clasificación de los pacientes*

Los pacientes serán clasificados como paciente uno, paciente dos y así sucesivamente hasta llegar al número once, para tener un control de las diferentes anatomías que estos poseen e identificar la manera en la que se distribuye la información, porque es importante conocerla y saber cuándo usarla. Esto debido a

que se requiere entrenar un modelo automatizado de segmentación de órganos, a raíz de esto importante saber de qué manera se entrenara y con que pacientes se está trabajando en el grupo de población.

### ***Reconstrucción de la base de datos***

Finalmente, luego de tener los pacientes anonimizados y clasificados, se procede a crear un repositorio local en una carpeta, a la cual se pueda acceder de manera oportuna para cargar las imágenes de los pacientes en el software que se usará para la reconstrucción volumétrica.

## **Implementación del software MONAI**

### ***Instalación***

Se documentará la forma de instalación del software en Windows, los requerimientos que este necesite. Se detallará cada paso con el fin de dejar una guía de todo el proceso que requiere MONAI para ser implementado como una posible alternativa a reconstrucciones volumétricas, además de que al ser un software relativamente nuevo casi no se encuentra información al respecto, no obstante, también se instalará un visor web en el cual se podrá hacer uso de todas las herramientas que ofrece el servidor del software.

### ***Pruebas de segmentación***

Posteriormente al tener el programa instalado y funcionando correctamente, el siguiente paso será realizar la segmentación de riñones en estudios que estén en un repositorio local de MONAI, esto con el fin de ver que tal es el comportamiento del estudio previo que contiene dicho servidor y analizar la segmentación que genera. Ya que como se mencionó anteriormente, es una red neuronal que ha sido entrenada usando estudios de tomográfica computarizada. Para realizar pruebas en estudios radiológicos se hace uso del software 3D Slicer y de la extensión que este posee de MONAIlabel, sin embargo, nuevamente para tener un correcto funcionamiento de MONAI con el visor de imágenes se requiere que este último sea desde la versión 5.0

### ***Entrenamiento del modelo***

Al identificar que el programa segmente correctamente en la base de datos que se descarga desde el repositorio del servidor, el siguiente paso será usar la base de datos local previamente creada y entrenar el modelo implementado. Esto con el fin de analizar el

comportamiento que tiene la red neuronal al cambiarle las dimensiones del estudio, la tonalidad de grises y la forma en la que se encuentran los riñones en estudios de RM, ya que difiere considerablemente con los de TAC.

### **Implementación del modelo**

Finalmente, luego de que se haya entrenado el modelo con la base de datos local, se procede a hacer pruebas con estudios de uroresonancia funcional, tanto para imágenes diagnosticas que no hayan sido usadas para el entrenamiento como todas las que se implementaron durante el proceso de aprendizaje, esto con el fin de verificar el funcionamiento del software en estudios de RM.

### **Comparación estudio realizado con el software actualizado**

Luego de obtener los resultados de Monailabel para realizar segmentación renal, se realizaron pruebas de segmentación con el software conocido como pMRI, el cual es una actualización de chop fMRU una herramienta desarrollada para estudios uroresonancia funcional, es decir, una herramienta medica con bases matemáticas con el fin de orientar a los médicos radiólogos a través de gráficas y valores cuantitativos para determinar la funcionalidad del sistema renal.

Finalmente, se procede a realizar el último objetivo el cual consiste en la comparación de los resultados obtenidos en el nuevo software con el finde identificar la viabilidad de este e implementar la transición dentro de la institución.

## **Resultados**

### **Construcción de la base de datos**

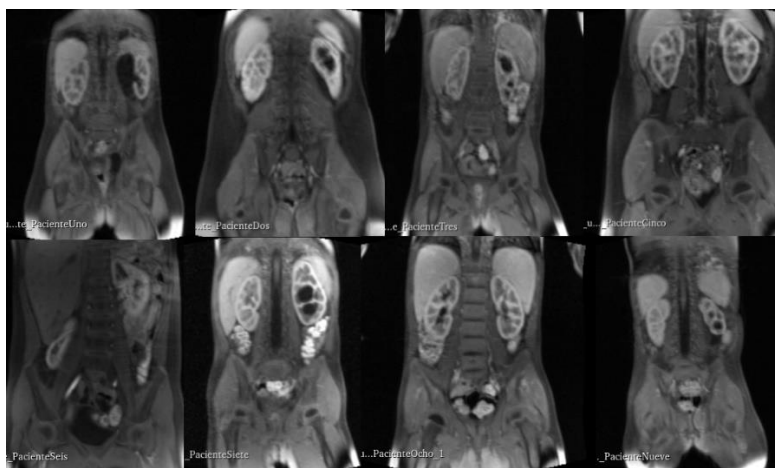
Para realizar este trabajo se hizo uso de estudios de resonancia magnética adquiridos por la fundación instituto neurológico de Colombia, sin embargo, al ser una entidad privada y al poseer información de las pacientes se requieren permisos de la misma entidad para poder usar la información con fines académicos. Por tal motivo, antes de hacer uso de la información se tuvo un encuentro con el comité de ética de la fundación instituto neurológico de Colombia, la cual está compuesta por un grupo de médicos de distintas áreas donde se evalúa principalmente el tipo de riesgo del estudio a realizar, los principios bioéticos y como estos se verían influenciados por la implementación del modelo automatizado. Se expone ante ellos el proyecto y se explica detalladamente que se espera de la institución, con qué fin se hará y cuál es el objetivo de este y la



proyección que tendría con base en las nuevas tecnologías que se acercan cada vez a Colombia en términos académicos, finalmente la solicitud fue aprobada y pude acceder a la información del INDEC.

Al realizar la caracterización de la base de datos se encontró que entre los once estudios encontrados en el repositorio de información de la fundación instituto neurológico de Colombia, seis de ellos tienen los riñones anatómica y estructuralmente normales, es decir, sin diferencia considerable con lo esperado a observar de niños entre ese rango de edad, los estudios restantes están fuera de dicho valor cualitativo de normalidad. Los pacientes dos, tres, cuatro, cinco, ocho y diez fueron los que se encontraban dentro de los rangos normales observables, es decir, se usaron como sujetos de control para la segmentación renal. El paciente uno se encontraba con el riñón izquierdo cercano al extremo intercostal de dicha región, el paciente seis presenta una anomalía anatómica, ya que el riñón derecho se encontraba cerca de la región pélvica, adyacente a la vejiga, el paciente siete posee el riñón izquierdo desplazado levemente vertical hacia arriba, cerca de los pulmones, el paciente nueve presenta el riñón izquierdo más pequeño que el derecho, el paciente once con el riñón derecho más grande que el izquierdo. Para todos los pacientes se realizó el mismo protocolo de adquisición de las imágenes, esto se hizo con el fin de tener un dataset más confiable.

**Figura 1.** Clasificación de la base de datos con pacientes anonimizados

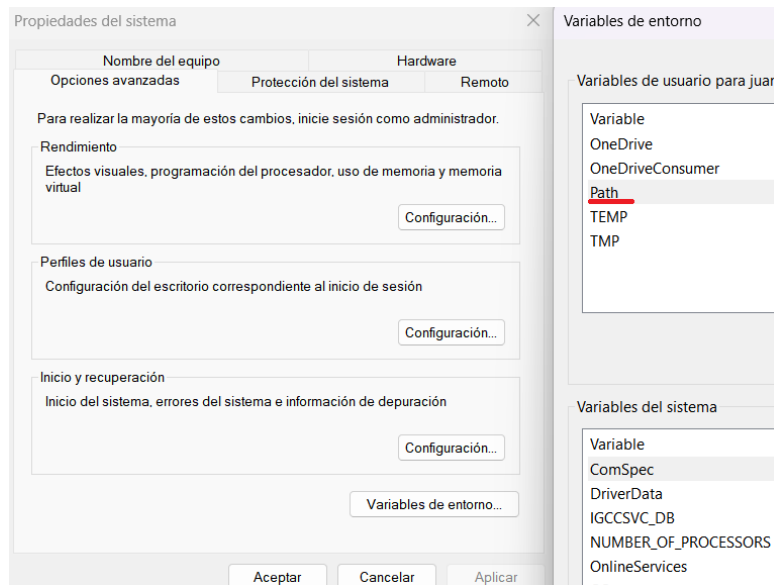


### **Documentación instalación y uso del software Monailabel**

En primera instancia se instala Python 3.8 o 3.9, ya que son las versiones estables para el uso de MONAI, luego de verificar que se encuentre instalado, se procede a identificar la ubicación de Python en el Path haciendo uso de las variables de entorno, para acceder a ellas a través de Windows, se hace a través de la barra de inicio buscando variables de entorno, posterior a ello se abre el editor de estas, luego se selecciona la ruta Path para finalmente agregar la dirección en la

cual se encuentra guardada la versión de Python estable del servidor MONAI. Esto se hace con el fin de evitar algún error por la ubicación de los archivos.

**Figura 2.** Variables de entorno en la ruta Path



Al tener el enrutamiento de Python en el Path y la versión más estable del software, se procede a instalar MONAI. Para ellos se hace uso de las siguientes líneas de código en el interpretador de comandos (CMD).

**Figura 3.** Comandos de instalación elementos necesarios en Python

```
python -m pip install --upgrade pip setuptools wheel

# Install latest stable version for pytorch
pip install torch torchvision torchaudio --extra-index-url https://download.pytorch.org/whl/cu113

# Check if cuda enabled
python -c "import torch; print(torch.cuda.is_available())"
```

Verificar que cuda esté disponible, se hace para equipos que posean una GPU NVIDIA ya que estos al ser parte del equipo de MONAI, crearon esa conexión con el fin de optimizar los procesos a través de sus tarjetas gráficas. Para lograr dicho enlace se debe consultar la documentación de CUDA y verificar la serie y el nombre de la tarjeta que se tiene, además de instalar los controladores de esta. Al instalar los requerimientos de Python, se procede a instalar MONAI junto con ejemplos de datasets para la verificación de su correcto funcionamiento, además la línea de ejecución del servidor que va enlazado al equipo donde se implementara el software.

**Figura 4.** Comandos de instalación MONAI

```
# install MONAI Label
pip install monailabel

# download Radiology sample app to local directory
monailabel apps --name radiology --download --output .

# download Task 2 MSD dataset
monailabel datasets --download --name Task09_Spleen --output .

# start the Radiology app in MONAI Label server
# and start annotating the downloaded images using deepedit model
monailabel start_server --app radiology --studies Task09_Spleen/imagesTr --conf models deepedit
```

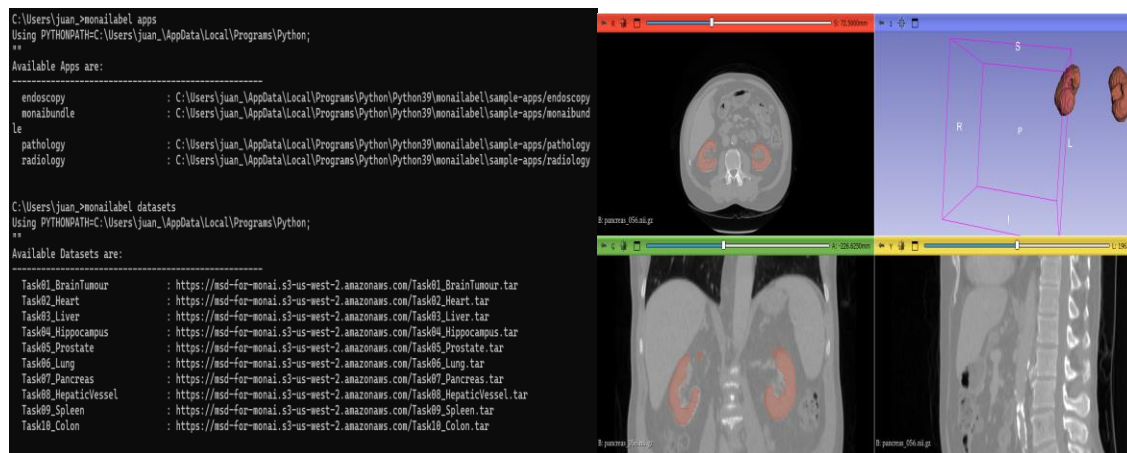
Por otra parte, luego de verificar el funcionamiento de MONAI con un su propio dataset. Se hará uso de la base de datos previamente creada y para ellos se ejecuta la siguiente línea de comando.

**Figura 5.** Comando para ejecutar el servidor de MONAI con base de datos local

```
# start the DeepEdit app in MONAI Label server
# on the empty dataset folder
monailabel start_server --app radiology --studies my_dataset --conf models deepedit
```

Dentro del software hay un grupo de datasets predeterminados, de los cuáles el usuario se puede conectar a cualquiera de ellos con el fin de analizar y observar el funcionamiento de este para la segmentación del órgano de interés.

**Figura 6.** Datasets disponibles para descargar del repositorio online del servidor MONAILABEL y segmentación de estudio dentro del dataset Task10\_colon

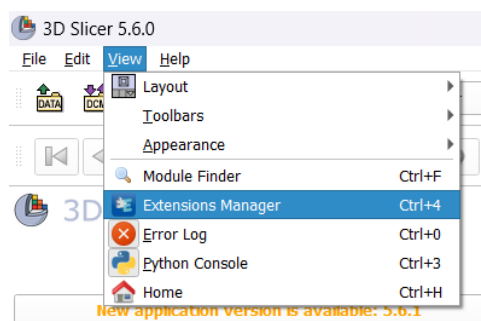


Se eligió el dataset Task10\_Colon aleatoriamente, ya que en ningún repositorio su segmentación está orientada a los riñones, sin embargo, el 80% están relacionados con el abdomen por tal motivo es posible hacer uso de cualquiera de estos para realizar pruebas, como se puede observar la segmentación presentada de manera automática por el software es bastante acertada a la anatomía de los riñones, a pesar de no ser el órgano de interés que se encuentra preparado dentro

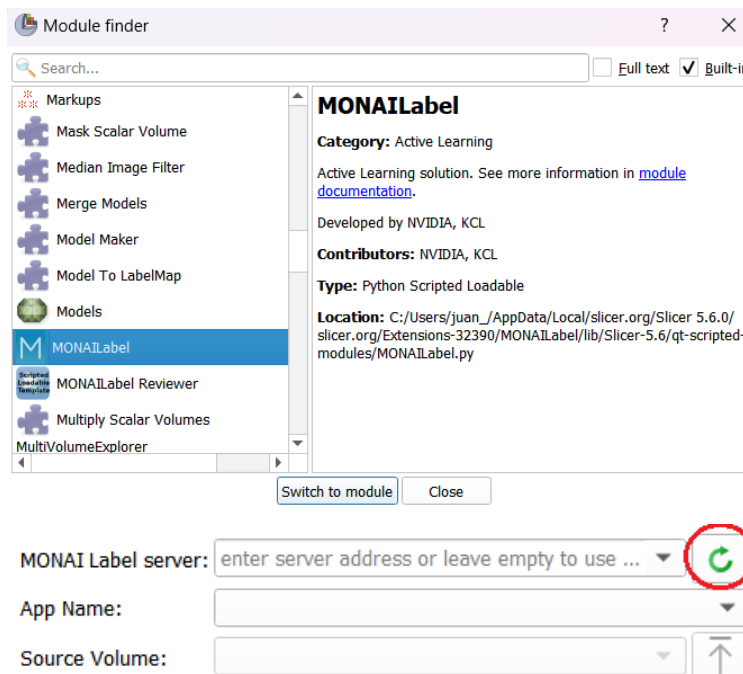
de los contenedores online que dispone el software MONAILABEL para verificar su funcionamiento.

Posterior a ello se procede a instalar la extensión MONAI en el visor 3D slicer, luego de su instalación se cambia en la interfaz al módulo del servidor del software Monailabel, para finalmente conectarse a este y poder acceder al dataset inicializado previamente a través del código, esto se realizó con el fin de probar el correcto funcionamiento del software tanto para estudios del dataset interno de la interfaz como para estudios de TAC externos, que se encuentran en la fundación instituto neurológico de Colombia.

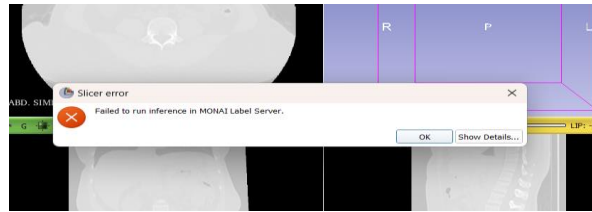
**Figura 7.** *Instalación extensión MONAI en 3D Slicer*



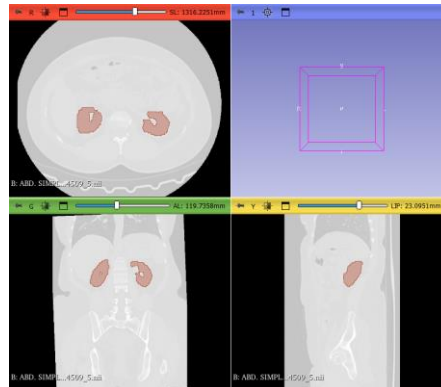
**Figura 8.** *Cambiar al módulo de MONAILabel en 3D Slicer y conectarse al servidor*



**Figura 9.** *Segmentación fallida estudio de TAC del FINDEC*



**Figura 10.** Segmentación TAC estudio de TAC del FINDEC



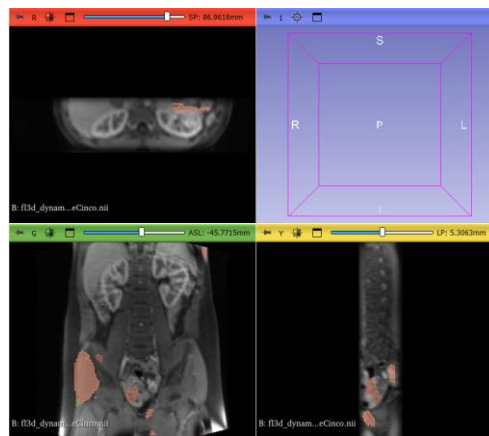
Primero se cargó el archivo con la secuencia de interés del TAC de abdomen adquirido en el FINDEC, sin embargo, este proceso se hizo estando en el dataset de colon mencionado anteriormente pero el sistema no reconoció el estudio que se agregó manualmente, por ello arrojo un error de conexión al servidor. Así que para solucionar esta problemática se cargó el servidor de monailabel desde una carpeta local que solo contuviera el examen anonimizado de TAC del FINDEC, donde al realizar dicho cambio se llegó a la segmentación esperada de los riñones.

Se realizó la comparación de la segmentación que realiza el software para estudios de TAC externos y para un estudio de la fundación instituto Neurológico de Colombia, se pudo observar que el software identificó claramente los riñones e hizo una segmentación correcta en cada corte generando así una reconstrucción volumétrica cercana a la anatomía real del riñón de los pacientes analizados.

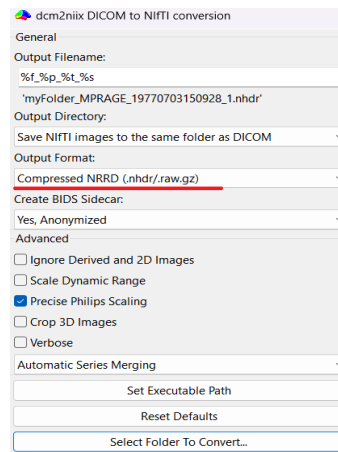
Luego de verificar que el software funciona en estudios de tomografía, se procedió a identificar entrenar el modelo para resonancia magnética, por tal motivo al tener una secuencia de adquisición con demasiados cortes temporales, fue necesario identificar en cual de estos se encontraban mejor contrastados los riñones, ya que es más fácil entrenar el modelo con los órganos detallados, por ello se hizo uso del software MRICron para transformar el archivo DICOM de la secuencia a NifTI, ya que de esta manera se puede encontrar la sección de cortes en dónde se encuentra mejor contrastado los riñones, la conversión que se usó fue la compressed NRRD, ya que no generó rotación de las imágenes al llevarlas al visor 3D slicer. Luego de tener la conversión

de todas las imágenes, se abrieron cada una de ellas en MRICron y al seleccionarlas este software permite elegir el corte que se desea visualizar, dónde ya se conoce la ubicación de estos con mejor contraste porque son datos almacenados en el repositorio de estudios en la fundación instituto neurológico de Colombia. De esta manera se reconstruyó la base de datos para entrenar el modelo y segmentar riñones en estudios de resonancia magnética, además se creó una carpeta la cual solo contiene los estudios de resonancia magnética previamente convertidos a formato NifTI, esto con el fin de evitar desconexiones en el servidor como ocurrió al intentar segmentar el estudio de TAC y revisar como segmenta el software sin entrenamiento para estudios de resonancia magnética.

**Figura 11.** Segmentación estudios de resonancia sin entrenamiento



**Figura 12.** Formato usado en el software MRIconvert para archivos DICOM a NifTI

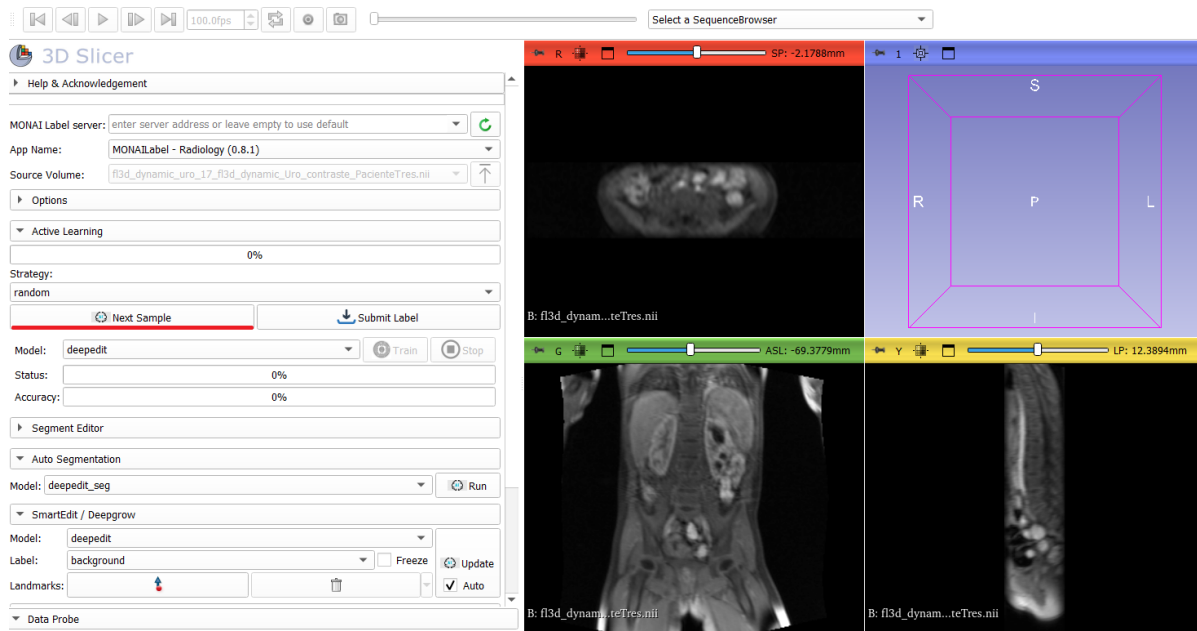


Para entrenar la red neuronal se decidió inhabilitar el modelo predeterminado que tiene MONAI cuando se descarga el software, para llegar a dicha ruta se busca la carpeta apps/Radiology/lib/configs/Deepedit y se puede abrir el código en un bloc de notas, se realiza el cambio y se guarda para que se pueda ver reflejado.

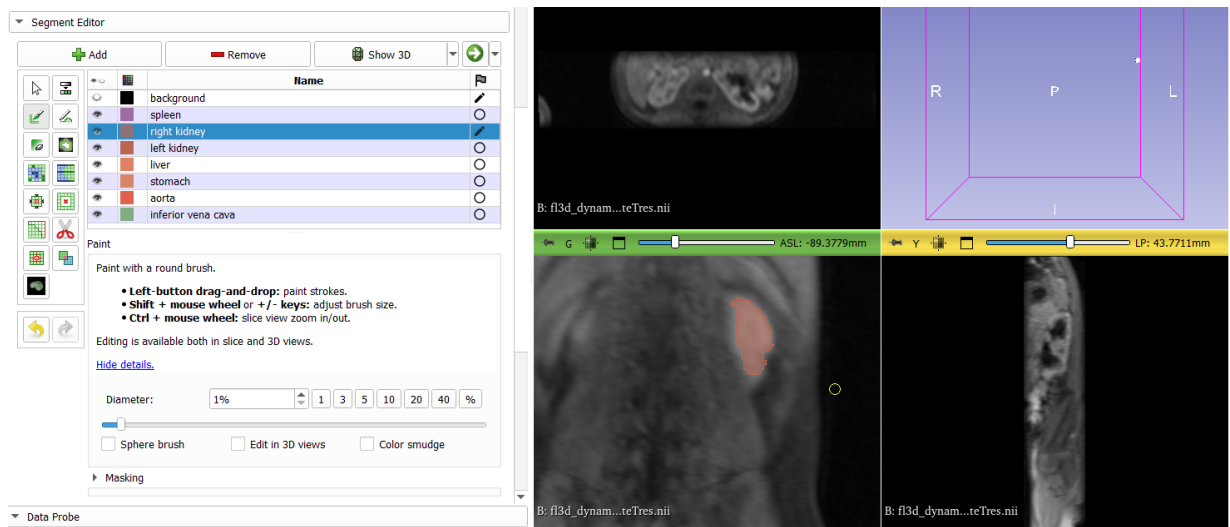
**Figura 13.** Código para habilitar el modelo preentrenado al abrir la carpeta Deepedit con bloc de notas

```
# Download PreTrained Model
if strtobool(self.conf.get("use_pretrained_model", "false")):
    url = f"{self.conf.get('pretrained_path', self.PRE_TRAINED_PATH)}"
    url = f"{url}/radiology_segmentation_segresnet_multilabel.pt"
    download_file(url, self.path[0])
```

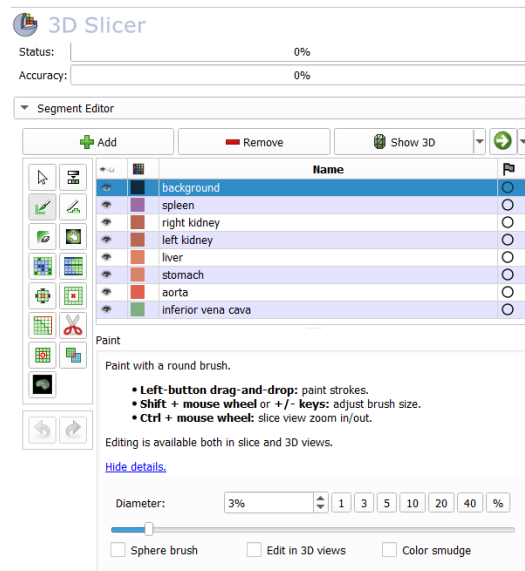
**Figura 14.** Visualización del dataset local en 3D slicer usando el módulo de Monailabel



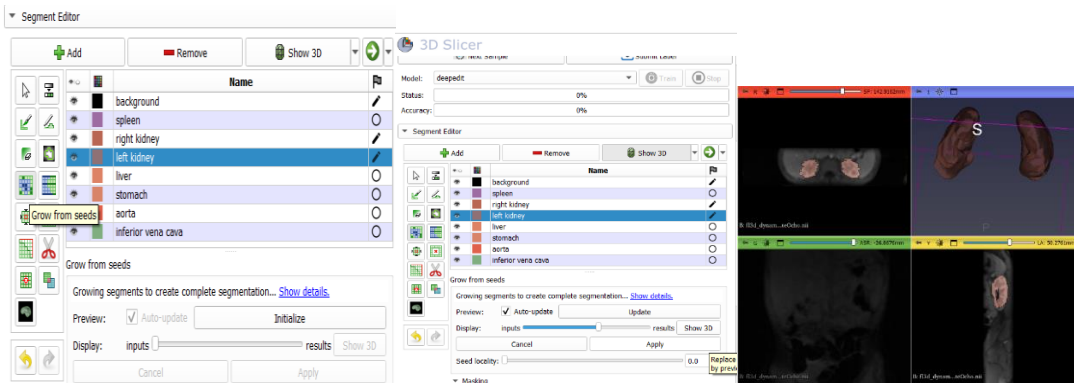
**Figura 15.** Segmentación manual riñón derecho



**Figura 16.** Menú herramienta Segment Editor



**Figura 17.** Segmentación total background y riñones, uso de la herramienta *Grow from seeds*



Luego de tener cargados los estudios de resonancia preparados anteriormente, se comienza a realizar la segmentación de los riñones manualmente, ya que se requiere entrenar el modelo para un formato distinto al cual estaba acostumbrado. Para esta sección, se hizo uso de la herramienta gráfica que posee el software la cuál es Segmentor Editor, con el fin de realizar la segmentación renal corte por corte hasta finalmente tener el volumen de los riñones y observar su estructura en 3D.

En la sección izquierda del Segment Editor, se encuentran las herramientas para realizar la segmentación manual de los órganos de interés, dónde se hizo uso del botón Paint, Erase y Grow from Seeds, para realizar la segmentación renal corte por corte de manera precisa, los demás botones presentes tiene funciones de ayuda para determinar mismas tonalidades dentro del corte, encontrar regiones de interés, aplicar operaciones lógicas entre dos regiones distintas, también es



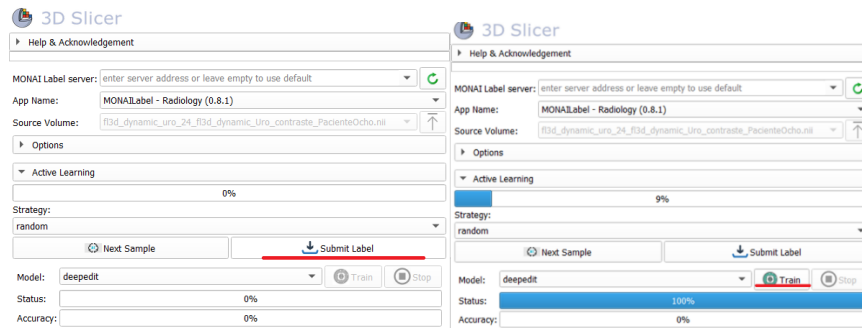
posible eliminar o suavizar zonas, cada una de estas posee una leve descripción al seleccionarla dentro del módulo. A pesar de esto para este estudio las herramientas relevantes y necesarias fueron las mencionadas al inicio del párrafo. Los botones de la parte superior sirven para agregar o eliminar órganos, que se deseen o no segmentar dentro del estudio, ya que la lista que se muestra en la imagen es por defecto la habilitada en el código del sistema.

En la segmentación manual, primero se procesó el background, esto se hizo con el fin de que solo se reconociera la región de interés, donde en este caso son los riñones al hacer el proceso con estos, es decir, el background abarca todo lo que no es de interés dentro de los cortes, por ello cuando se comienza a realizar la segmentación renal es más sencillo para el software identificar la región que se desea reconstruir.

Posteriormente, cuando se segmenta completamente ambos riñones junto con el background se procede a usar la herramienta Grow from seeds, la cual identifica las secciones realizadas manualmente y segmenta completamente los órganos de interés con base en las regiones que fueran delimitadas previamente. El proceso se ejecuta al hacer clic en el botón Initialize, si la segmentación que muestra el sistema al hacer uso de la herramienta es acorde a lo esperado, es decir, anatómicamente corte por corte los riñones estén bien definidos. Se valida el procesamiento haciendo clic en el botón Apply, a pesar de ello, si los resultados no son acordes a la anatomía del riñón en algún corte se puede editar y repetir la segmentación en los cortes que sean necesarios.

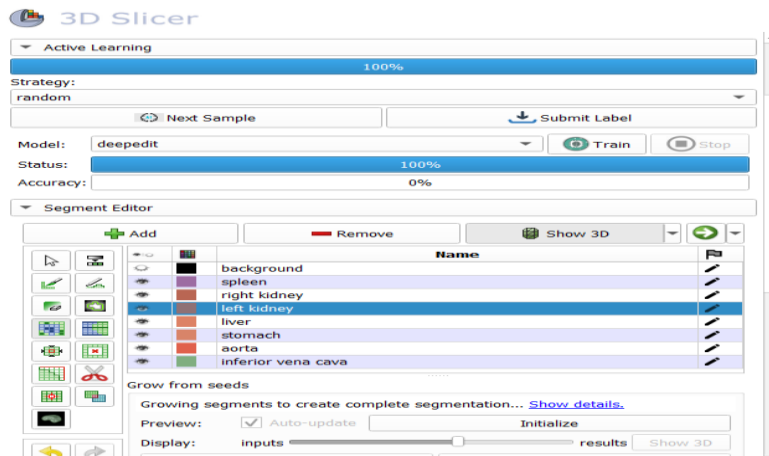
Cuando se tiene la segmentación renal completa, sigue el paso más importante y es entrenar el modelo de red neuronal, para ello después de hacer clic en el botón Apply como se mencionó anteriormente, el usuario debe dirigirse a la opción active learning del menú ya hacer clic en el botón Submit label, de esta manera el dataset creado para resonancia magnética se empezará a cargar al servidor del software para posteriormente realizar el entrenamiento del modelo al hacer clic en el botón Train.

**Figura 18.** *Menú entrenamiento del modelo para la red neuronal*



Luego este paso se realiza con cada uno de los pacientes con el fin de entrenar el modelo para que ubique la zona de interés en estudios de resonancia magnética de manera automática.

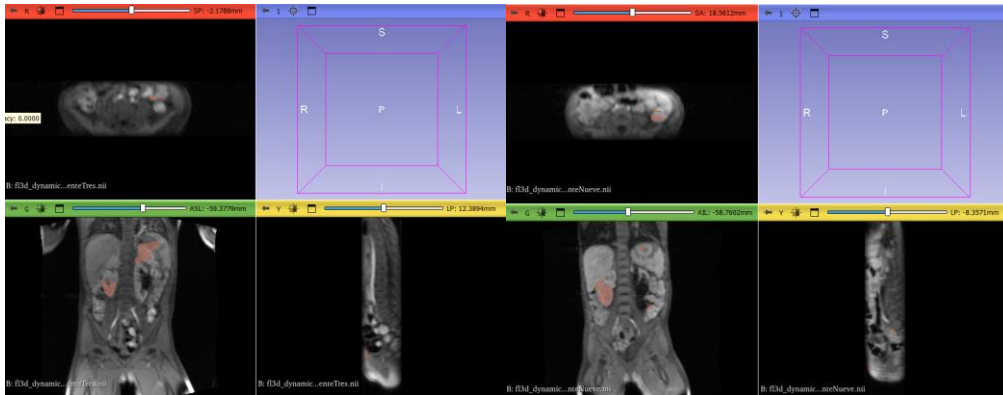
**Figura 19.** Entrenamiento al 100% de RM usando MONAIlabel



Luego de verificar el correcto funcionamiento con el servidor y la conexión de este a través de la extensión de 3D Slicer, se realizó la segmentación manual para cada estudio de resonancia magnética hasta llegar al 100% del entrenamiento del dataset, donde se tienen almacenados 11 estudios, por cada estudio el porcentaje de entrenamiento sube un 9%, es decir, el entrenamiento se adapta a la cantidad de estudios presentes en la base de datos creada. Posterior a esto se hizo uso de una nueva red neuronal completamente construida para este tipo de estudios, sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios. El software no reconocía las imágenes como un nuevo servidor, así que inhabilito los procesos y no se pudo observar si estaba realizando su objetivo, el cuál era segmentar. Al encontrar este error, se decidió dejar el modelo preentrenado y unificar la base de datos local junto con la online, reentrenar el algoritmo con el fin de encontrar una posible solución a las dos problemáticas anteriores, no obstante, a pesar de que se conectó al servidor la segmentación de estudios de resonancia continuó estando fuera del cuerpo de los pacientes. Por ello se decidió entrenar el modelo nuevamente creando dos nuevas rutas con los mismos estudios

de resonancia, una para entrenar el modelo y otra para verificar el funcionamiento de este, ya que todo queda almacenado en el mismo servidor al habilitar nuevamente en el código el modelo preentrenado.

**Figura 20.** Segmentación renal en resonancia magnética con el modelo entrenado



Finalmente, se obtuvo una mejoría considerable en la segmentación de los riñones, ya que el software es capaz de identificar la región de interés, aunque no es una segmentación completa, por lo tanto, no realiza una reconstrucción de los órganos de interés.

### Comparación del software usado actualmente en el FINDEC con su versión actualizada

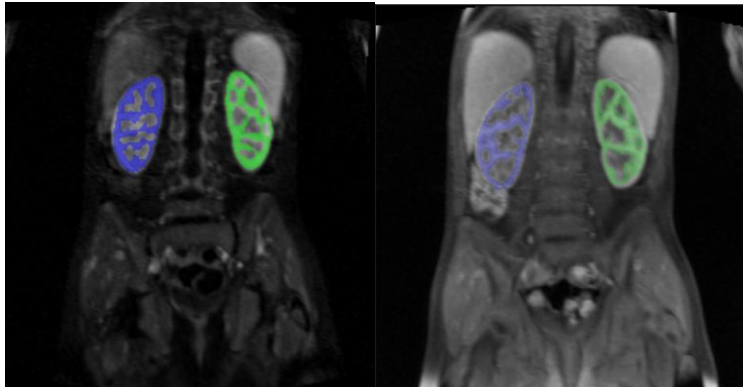
Se debe comparar los resultados obtenidos previamente con los que se adquieran a través del nuevo aplicativo, por lo tanto, se realizan pruebas comparativas e identifica su funcionamiento. Primero el software requiere tener el archivo de la secuencia adquirida por el resonador y debe estar en formato de archivo DICOM, para importarla al software se debe hacer clic en la opción File, la cual se encuentra en el costado izquierdo superior del visor, posterior a ello se usa la herramienta MRU, para entrar en dicha opción se debe seleccionar Dynamic (esta depende del protocolo de adquisición usado para estudios de uroresonancia funcional) dar clic derecho y irse hasta la opción MRI y en dicha opción seleccionar MRU, luego el software va a ingresar al menú dónde se puede observar toda la secuencia y desplazar con el scroll del mouse en la cantidad de cortes tomados o presionando la tecla control y usando nuevamente el scroll se trasladaría en el tiempo.

Al ingresar al sistema, se procede a hacer clic derecho en el pentágono que está ubicado en el menú en la parte inferior izquierda u oprimir la tecla '3' repetidamente hasta que el cursor del ratón tome forma de riñón. Cuando esto suceda, en la pantalla en la zona inferior derecha hay un menú en el cual se puede seleccionar A (Arteria aorta en rojo), R (Riñón derecho en azul) y L (Riñón izquierdo en verde), todas tres se deben implementar para realizar correctamente el estudio,

no hay un orden para alguna de ellas, lo importante es que cuando se selección se debe hacer doble clic en las pantalla y esta se redireccionara a la secuencia del estudio en el tiempo, en esta regio se debe seleccionar toda la región del órgano a segmentar, con clic derecho se generan las líneas y con el izquierdo se borran. Cuando se tenga la región de interés se segmenta cada órgano, en el caso de la arteria aorta se segmenta desde el momento en que esta cambia de tono cuando el contraste entra al cuerpo, al terminar la segmentación se hace doble clic y el sistema de manera automática identifica en todos los cortes la arteria o semejantes, por este motivo, se debe revisar porque tiende a tener errores. En el caso de los riñones se realiza el mismo procedimiento, no obstante, en ellos no se debe tomar el sistema colector a excepción de la medula renal, cabe resaltar que para eliminar regiones seleccionadas se hace uso del clic izquierdo del ratón y para agregar el derecho. También es importante que al terminar la segmentación haciendo doble clic, se pueden eliminar zonas que estén fuera del órgano o región de interés presionando la tecla 'shift t+ x' y luego con el clic derecho del ratón se pueden eliminar imperfectos de la segmentación.

Al tener los órganos segmentados, se procede e evaluar la funcionalidad de esos identificando el tiempo de tránsito calicial (TTC) y el tiempo de tránsito renal (TTR), para ello se hace clic en el ojo que encuentra en el menú en la zona inferior izquierda y luego dando clic derecho en la imagen y seleccionando la opción 'subtraction' y finalmente presionando la letra 'M' se ingresa al visor de interés, dónde acá se desplazara la secuencia a través del tiempo y cuando se detecten puntos de tonalidades en los riñones, es decir, un ingreso del contraste al riñón en la corteza renal o en zonas más cercanas a los calices renales para identificar la parénquima del sistema renal se añaden los tiempos TTC haciendo clic derecho en el menú de los órganos mencionado anteriormente y activando la opción en ingles de TTC para cada riñón, de igual manera se realiza para el TTR, no obstante, en este caso se añade el tiempo cuándo el contraste comienza a viajar a través del sistema colector por el uréter hacia la vejiga.

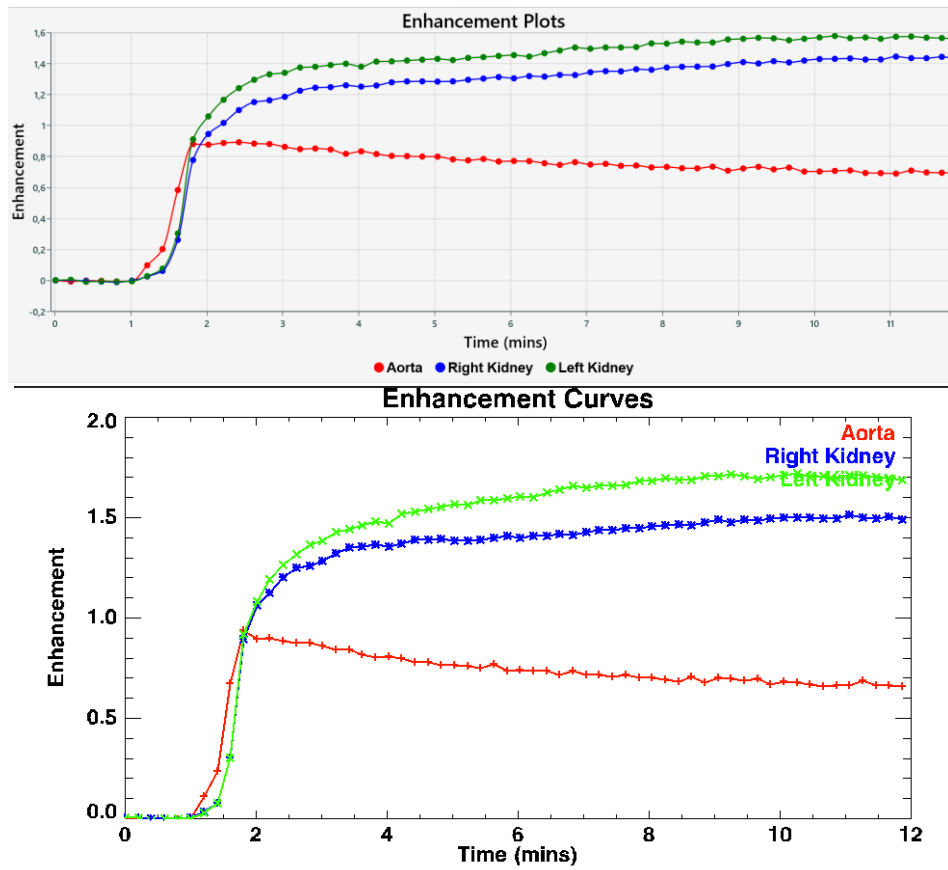
**Figura 21.** Segmentación renal, antiguo sistema (ubicación derecha) y sistema a implementar (ubicación izquierda)



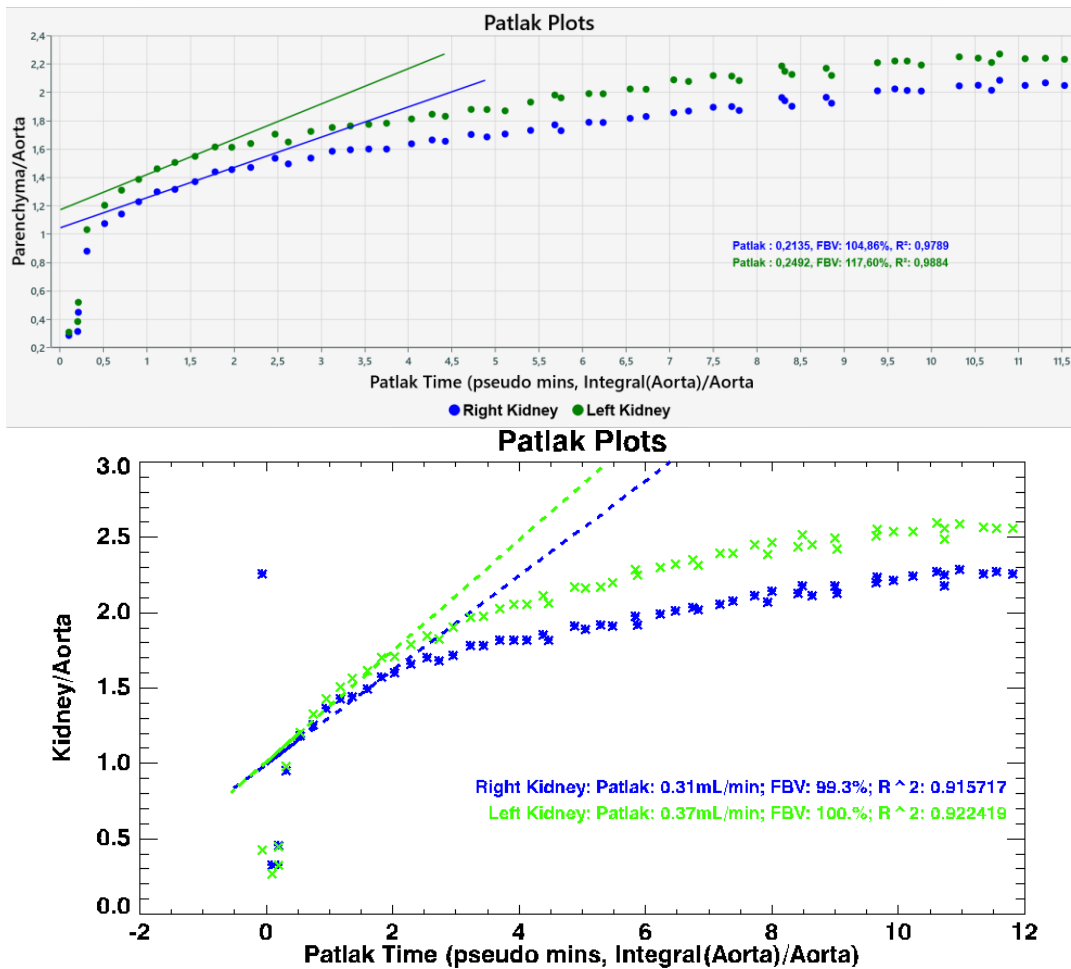
**Figura 22.** Tabla de resultados funcionalidad sistema renal, antiguo sistema (ubicación derecha) y sistema a implementar (ubicación izquierda)

	Right Kidney	Left Kidney		Right Kidney	Left Kidney
CTT [min, sec]	4m 38s	4m 38s	1. CTT	4min(s) 37sec(s)	4min(s) 37sec(s)
RTT [min, sec]	6m 26s	5m 50s	2. RTT	6min(s) 50sec(s)	5min(s) 50sec(s)
TTP [min, sec]	9m 51s	9m 3s	3. TTP	10min(s) 15sec(s)	9min(s) 27sec(s)
Volume [mL]	54,00	51,55	4. Whole Volume(mL)	X	X
vDRF [%]	51,16	48,84	5. Parenchymal Vol(mL)	52.92mL	57.43mL
pDRF [%]	46,14	53,86	6a. vDRF	47.95%	52.04%
vpDRF [%]	47,30	52,70	6b. pDRF	45.95%	54.04%
Patlak [(mL/min)/mL]	0,21347	0,24916	6c. vpDRF	43.93%	56.06%
			7. Difference vDRF pDRF	1.996%	1.996%
			8. Patlak(mL/min)/mL	0.31290	0.36795
			9. BSA Patlak(mL/min)/mL	0.62057	0.72975

**Figura 23.** Grafica de curva de realce a través del tiempo, antiguo sistema (ubicación inferior) y sistema a implementar (ubicación superior)



**Figura 24.** Gráfico de Patlak sistema renal, antiguo sistema (ubicación inferior) y sistema a implementar (ubicación superior)



## Discusión

Monailabel es una herramienta bastante útil para realizar segmentación de órganos, puesto que, es un software de libre uso y está en constante entrenamiento el protocolo de redes por el cuál este compuesto. No obstante, en el repositorio online que tiene no cuenta con un dataset para riñones, es decir, tiene 10 diferentes bases de datos con diferentes estudios de tomografía para realizar reconstrucción de órganos dentro de estos, en la figura 14 se pueden observar las opciones que este posee por defecto. Además de ello, acá se puede encontrar una falencia de sistema y es que no cuenta con estudios de resonancia magnética y este fue un desafío grande para el desarrollo del proyecto, ya que a pesar de contar con estudios de esta índole dentro de la fundación instituto

neurrológico de Colombia, es información que pertenece a los paciente y se debe proteger la integridad de estos, por ello para acceder a los estudios de interés se debió realizar a través de una reunión con el comité de ética del FINDEC exponiendo los beneficios de las nuevas tecnologías y resaltando que no se violaran los principios bioéticos de los pacientes junto con el riesgo que posee la investigación con base en la resolución 8430 de 1993. Sin embargo, tampoco se encuentran repositorios en algún servidor online relacionado con estudios de resonancia magnético-enfocada en riñones, por ello fue importante resaltar el debido proceso de solicitar la información que se tiene dentro de la fundación instituto neurrológico de Colombia.

Al usar un repositorio predeterminado por el software el cual fue el task10\_Colon la herramienta segmento los riñones anatómicamente bien cómo se puede ver en la figura 14, a pesar de esto, son estudios de tomografía y están fuera del principal objetivo de este proyecto. De la misma forma que esta entrenado el modelo, se decidió hacer pruebas con estudios de tomografía del FINDEC e identificar si funciona correctamente con repositorios o secuencias externas a las predeterminadas por el sistema, al agregar el archivo y segmentarlo automáticamente por el sistema, salió un error en el servidor como se muestra en la figura 15. En ese momento es difícil encontrar una razón por la cual el servidor rechazara la segmentación, ya que podían ser diferentes motivos tales como, diferencias de tamaño entre los píxeles de la imagen, es decir, el formato que estos poseen cambia las direcciones en las cuales el protocolo de redes neuronales está entrenado y hacía que el servidor se desconectara o quizás solo funcionaba con estudios del repositorio local. Con motivo de lo anterior mencionado, se creó un repositorio tanto para los estudios de resonancia del FINDEC previamente anonimizados y convertidos en formato de archivo .NIIFTI y otro con solo el archivo de la tomografía de la institución en el mismo formato, se realizó la conexión a cada servidor y para el estudio de CT se obtuvieron resultados muy satisfactorios, generando una excelente reconstrucción volumétrica de los riñones como se muestra en la figura 16, en cuanto a la RM la reconstrucción no fue satisfactoria como se muestra en la figura 17, el software no reconoció los riñones, trato de segmentar figuras semejantes a las que se encuentran modeladas dentro de la red neuronal, la cual ya está entrenada. Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió entrenar nuevamente el modelo con el dataset de los estudios de RM y para ello se inhabilito el modelo preentrenado previamente como se muestra en la figura 20 y se reentrenaron con el fin de orientar la herramienta a la segmentación de estudios de resonancia, al realizar el primer entrenamiento se pudo observar que el sistema identifica la cantidad de estudios que se encuentran



en el dataset y con base en estos arroja un porcentaje para cada estudio entrenado, por ejemplo en este caso se disponen de 11 estudios, donde cada uno entrega el 9% al entrenamiento total del modelo, así pues al llegar al 100% del entrenamiento se intentó cargar un estudio perteneciente al mismo dataset creado para RM, no obstante, el sistema no lo reconoció y se desconectó del servidor además de que al terminar de recorrer el dataset no vuelve al inicio, es decir, llega al último estudio y al parecer pierde la dirección de los estudios no reinicia el apuntador de la dirección de memoria. Ahora bien, con base en todo lo anterior mencionado, se procedió a realizar nuevamente un dataset nuevo con estudios de RM conectarlo al servidor e identificar el resultado de la segmentación, como se muestra en la figura 22 la segmentación mejoro considerablemente, puesto que ya la región de interés si es acorde a la ubicación de los riñones, simultáneamente no fue una reconstrucción volumétrica completa, solo identifico la ROI y mejoro el reconocimiento de las estructuras. Cabe resaltar que el software posee dos métodos para conectarse al servidor, el primero es segmentation y el segundo es deepedit. En este estudio se realizó la segmentación y el entrenamiento con ambos métodos, en los cuales la única diferencia significativa que se encontró fue en la segmentación manual de los riñones, donde por el método segmentation el sistema abarcaba zonas fuera de los límites del riñón, no fue muy exagerado pero si mostro unos sobrepicos y aumento del tamaño real del riñón dentro de los cortes, así pues usando el deepedit la segmentación manual fue más sencilla este modelo reconoció mejor la región de interés y no generó esos sobrepicos y abultamientos en los cortes de cada pixel en la reconstrucción de los riñones.

En la figura 23 se puede observar la segmentación renal de un estudio para un mismo paciente de prueba, donde solo se toma en cuenta la corteza renal y se elimina del órgano la medula renal, esto con el fin de identificar el volumen que se acumula en la corteza del riñón y analizar los tiempos de tránsito calicial y renal para cada riñón, además de esto en las figuras 23 y 24 se puede observar cómo los valores son muy similares usando la primer versión del software la cuál fue el chop fMRU y la versión actual conocida como pMRI, donde los valores pico de las curvas son muy cercanos, teniendo una variación de  $\pm 1$  en las curvas de mejora. Lo cual no debería implicar cambios considerables en los resultados, es decir, se debería notar la misma tendencia del software actualizado al usado anteriormente, ahora bien es algo que no se refleja en lo valores obtenidos para la función renal diferencial volumétrica vDRF y la función renal diferencial Patlak pDRF, aunque los valores se asemejan hay una discrepancia considerable en el volumen, debido a que el riñón izquierdo usando la herramienta sin actualizar presenta mayor volumen renal que el derecho,

a pesar de esto en la herramienta actualizada el riñón derecho es el que posee más volumen y por este motivo altera los resultados obtenidos, esto implica que no cumple con los requisitos para actualizar el sistema y hacer uso de este, además de ello la variable de Patlak, la cual es una pendiente que mide mL/min es diferente considerablemente a la versión anterior, como se puede observar en la figura 26. Esto se debe principalmente al ajuste que posee el equipo actual teniendo una tendencia de acomodar la recta pendiente a valores en los cuales el cambio en el tiempo sea diferente de cero, mientras que en el software Chop se puede observar que las pendientes poseen una tendencia más cercana al eje de los mililitros lo cual tendría sentido cuando la diferencia en tiempo es cercana a cero. Esto es importante, ya que según el autor del sistema los valores de las curvas de mejora y Patlak deben ser los mismos para que el resultado no varíe de una versión a otra, no obstante, es algo que no está sucediendo. A pesar de que se puede ubicar manualmente la pendiente de las gráficas de Patlak, esta sigue sin influir en cambios considerables para el software actual, es decir, el procesamiento que genera es diferente al que se obtenía haciendo uso del software chop.

### **Conclusiones**

Indiscutiblemente la inteligencia artificial y el uso de herramientas que integren esta modalidad están siendo parte fundamental para el desarrollo industrial, por ello se reconoce la importancia de softwares como Monailabel en el campo de la medicina, ya que permite ahorrar tiempo en la identificación de la funcionalidad de órganos como los riñones, esto debido a que es una interfaz que permite realizar reconstrucción de órganos de manera automática. A pesar de que en este estudio no se haya podido obtener mejores resultados, si se logró evidenciar mejoría en la ubicación de los órganos de interés, por tal motivo se atribuye dicha falencia a la poca cantidad de estudios que se tenían para el entrenamiento del modelo.

Es importante conocer la documentación de un sistema e identificar posibles errores que estos posean o que algún usuario haya pasado por una situación similar, ya que al ser sistemas de libre uso su instalación y correcto funcionamiento va de la mano con entender cómo funciona y analizar que herramientas o programas externos requiere para entregar al máximo su rendimiento, ya que en este caso es posible verificar el porcentaje de similitud de la segmentación renal con el órgano real a partir de cada corte, puesto que posee una herramienta para analizar dicha situación, no obstante, requiere una GPU integrada para verificar el correcto funcionamiento. Además, la integración del servidor con los datasets y la base de datos son procedimientos que no tienen

documentación, a la final son situaciones que requieren hacer pruebas para lograr identificarlas. Por lo mencionado previamente, es importante realizar pruebas de cada paso que se vaya a realizar y documentarlo por sencillo que sea, tener estructurado un paso a paso es fundamental para obtener aumentar la información y finalmente compartirla con las personas que estén interesadas, es decir, la información es fundamental para el desarrollo y el progreso.

Los procesos manuales requieren tiempo para hacerlos, sin embargo, son fundamentales para el primer paso en cualquier modelo que se desee implementar, lo cual implica siempre definir una región de interés a trabajar y con base en dicha información se podrán obtener resultados de interés para médicos radiólogos o profesionales cercanos a las matemáticas o biología.

Se pudieron obtener resultados satisfactorios de la segmentación renal. Es decir, el modelo para RM funciona parcialmente y esto es un avance significativo, ya que muestra que la herramienta no está limitada a solo estudios de CT, es decir, siempre se debe ir más allá de lo que un software ofrece, adaptar las herramientas que existen a las necesidades y problemáticas que se puedan presentar.

El uso de pMRI mostro un avance significativo en la segmentación ya que en el software chop este proceso es bastante tedioso y largo, acá se siente fluido y sencillo la segmentación, lo cual implicaría reducción de tiempo en el posprocesamiento, no obstante, es una herramienta que aún no se puede implementar en el FINDEC, se debe someter a más pruebas determinando su correcto funcionamiento junto a algún medico radiólogo.

Las herramientas que hacen uso de inteligencia artificial son eso, procesos que requieren del desarrollo e intervención de profesionales para verificar su correcto funcionamiento, es decir, no se encargan de realizar un diagnóstico solo sirven como indicadores y medidas para analizar y verificar con profesionales encargados de dichos temas.

Finalmente, para concluir no hay herramientas perfectas, todo se construye con base de las necesidades y requerimientos que cada sitio establezca, ya que la diversidad del cuerpo humano es demasiado amplia y esto también genera que no se tenga un estándar para la segmentación renal sino un aproximado a las zonas de interés junto con su tamaño.

### Referencias

- [1] Saenz, F., Vera, M., & Rodríguez, R. (2020). Space-occupying lesions identification in medical imaging of the kidney: A review. In *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* (Vol. 39, Issue 6, pp. 787–794). Venezuelan Society of Pharmacology and Clinical and Therapeutic Pharmacology. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4407983>
- [2] Rosas Castillo, L. A., Yañéz Suarez, O., & Medina Bañuelos, V. (2021). *Segmentación de imágenes de resonancia magnética utilizando filtrado espacial y aprendizaje profundo* [Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica]. <https://doi.org/10.24254/CNIB.21.8>
- [3] Isacaz, N. (2018, April 26). *Pesos y medidas de los órganos del cuerpo humano*. <https://www.elsevier.com/es-es/connect/pesos-y-medidas-de-los-organos-del-cuerpo-humano>.
- [4] Rivera, D. M., Puentes, S., & Caballero, L. (2011). *Resonancia magnética cerebral: secuencias básicas e interpretación* ARTÍCULO DE REVISIÓN.
- [5] Kinsler, P. (2020). Faraday's Law and Magnetic Induction: Cause and Effect, Experiment and Theory. *Physics (Switzerland)*, 2(2), 150–163. <https://doi.org/10.3390/physics2020009>
- [6] Yepes, M. S. (2021). *Matemáticas y física de la resonancia magnética*.
- [7] *FACULTAD DE TECNOLOGÍA MÉDICA*. (n.d.). <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/5729>
- [8] Khrichenko, D., & Darge, K. (2010). Functional analysis in MR urography - Made simple. *Pediatric Radiology*, 40(2), 182–199. <https://doi.org/10.1007/s00247-009-1458-4>
- [9] Damasio, M. B., Bodria, M., Dolores, M., Durand, E., Sertorio, F., Wong, M. C. Y., Dacher, J. N., Hassani, A., Pistorio, A., Mattioli, G., Magnano, G., & Vivier, P. H. (2020). Comparative Study Between Functional MR Urography and Renal Scintigraphy to Evaluate Drainage Curves and Split Renal Function in Children With Congenital Anomalies of Kidney and Urinary Tract (CAKUT). *Frontiers in Pediatrics*, 7. <https://doi.org/10.3389/fped.2019.00527>
- [10] Estupiñán Ricardo, J., Leyva Vázquez, M. Y., Peñafiel Palacios, A. J., & Assafiri Ojeda, Y. el. (2021). Inteligencia artificial y propiedad intelectual. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(S3), 362–368. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2490/2445>

- [11] Esteban, J., & Miranda, D. (n.d.). *Método de segmentación de imágenes de la próstata tomadas mediante resonancia magnética mediante técnicas de inteligencia artificial.*
- [12] Diaz-Pinto, A., Alle, S., Nath, V., Tang, Y., Ihsani, A., Asad, M., Pérez-García, F., Mehta, P., Li, W., Flores, M., Roth, H. R., Vercauteren, T., Xu, D., Dogra, P., Ourselin, S., Feng, A., & Cardoso, M. J. (2022). *MONAI Label: A framework for AI-assisted Interactive Labeling of 3D Medical Images.* <http://arxiv.org/abs/2203.12362>
- [13] Conze, P. H., Kavur, A. E., Cornec-Le Gall, E., Gezer, N. S., Le Meur, Y., Selver, M. A., & Rousseau, F. (2021). Abdominal multi-organ segmentation with cascaded convolutional and adversarial deep networks. *Artificial Intelligence in Medicine, 117.* <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2021.102109>