

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN**



**ESCUELA DE POSGRADO**

**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN RADIACTIVA POR YODO(<sup>131</sup>I) CON  
DOSIMETRÍA INTERNA MEDIANTE EL MÉTODO MONTECARLO EN LA  
CLÍNICA SAN GABRIEL-LIMA-2019.**

**PRESENTADO POR:**

**FREDY CHOZO TUÑOQUE**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN ECOLOGÍA Y  
GESTIÓN AMBIENTAL**

**ASESOR:**

**Dr. Berardo Beder Ruiz Sánchez**

**HUACHO - 2022**

**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN RADIACTIVA POR  
YODO(131) CON DOSIMETRÍA INTERNA MEDIANTE EL  
MÉTODO MONTECARLO EN LA CLÍNICA SAN GABRIEL-LIMA-  
2019.**

**FREDY CHOZO TUÑOQUE**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**ASESOR: Dr. Berardo Beder Ruiz Sánchez**

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRO EN ECOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL  
HUACHO  
2022**

The logo of the Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrion Huacho is a circular emblem. It features a central sun with rays, a gear, and a stylized figure. The text "UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRION" is written around the top inner edge, and "HUACHO" is at the bottom. The logo is semi-transparent and serves as a background for the text.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo principalmente a Dios porque siempre está cuidándome, guiándome, y me bendice en cada proyecto que realizo.

Con mucho cariño lo dedico también a mis padres y familiares que me han brindado el sostén y la confianza para seguir adelante, también a todas las personas que me ayudaron a concluir este trabajo.

*Fredy Chozo Tuñoque*

## AGRADECIMIENTO

Inmensamente agradecido con Dios por la salud y la fortaleza que me ha brindado para poder culminar este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento a la Mg. Verónica Verde Rivera, por sus conocimientos, sus orientaciones, su apoyo y su asesoría durante todo el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al Mg. Cristian Milton Mendoza Flores, por su tiempo, amistad, conocimientos y su apoyo en la asesoría de esta tesis.

Expreso mi gratitud a mi familia, porque siempre me apoyo de manera incondicional a lo largo de mi carrera profesional.

Finalmente agradezco a toda la plana docente de la Maestría en Ecología y Gestión Ambiental, por brindarnos sus conocimientos, experiencias y su comprensión en todo momento.

*Fredy Chozo Tuñoque*

# ÍNDICE

<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>x</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>1</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Descripción de la realidad problemática</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Formulación del problema</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1 Problema general</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2 Problemas específicos</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Objetivos de la investigación</b>	<b>3</b>
<b>1.3.1 Objetivo general</b>	<b>3</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Justificación de la investigación</b>	<b>3</b>
1.4.1 Justificación Teórica	3
1.4.2 Justificación Práctica	3
1.4.3 Justificación Legal	3
1.4.4 Justificación Social	4
<b>1.5 Delimitaciones del estudio</b>	<b>4</b>
1.5.1 Delimitación Espacial	4
1.5.2 Delimitación Temporal	4
1.5.3 Delimitación Teórica	4
<b>1.6 Viabilidad del estudio</b>	<b>4</b>
1.6.1 Viabilidad técnica	4
1.6.2 Viabilidad ambiental	5
1.6.3 Viabilidad financiera	5
1.6.4 Viabilidad social	5
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>6</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Antecedentes de la investigación</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1 Investigaciones internacionales</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2 Investigaciones nacionales</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Bases teóricas</b>	<b>9</b>
	<b>v</b>

2.3	Definición de términos básicos	16
2.4	Hipótesis de investigación	18
2.4.1	Hipótesis general	18
2.4.2	Hipótesis específicas	18
2.5	Operacionalización de las variables	19
<b>CAPÍTULO III</b>		<b>20</b>
<b>METODOLOGÍA</b>		<b>20</b>
3.1	Diseño metodológico	20
3.2	Población y muestra	20
3.2.1	Población	20
3.2.2	Muestra	20
3.3	Técnicas de recolección de datos	20
3.4	Técnicas para el procesamiento de la información	21
<b>CAPÍTULO IV</b>		<b>22</b>
<b>RESULTADOS</b>		<b>22</b>
4.1	Análisis de resultados	22
4.2	Contrastación de hipótesis	35
<b>CAPÍTULO V</b>		<b>39</b>
<b>DISCUSIÓN</b>		<b>39</b>
5.1	Discusión de resultados	39
<b>CAPÍTULO VI</b>		<b>40</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>40</b>
6.1	Conclusiones	40
6.2	Recomendaciones	41
<b>REFERENCIAS</b>		<b>42</b>
7.1	Fuentes documentales	42
7.2	Fuentes bibliográficas	43
<b>ANEXOS</b>		<b>45</b>

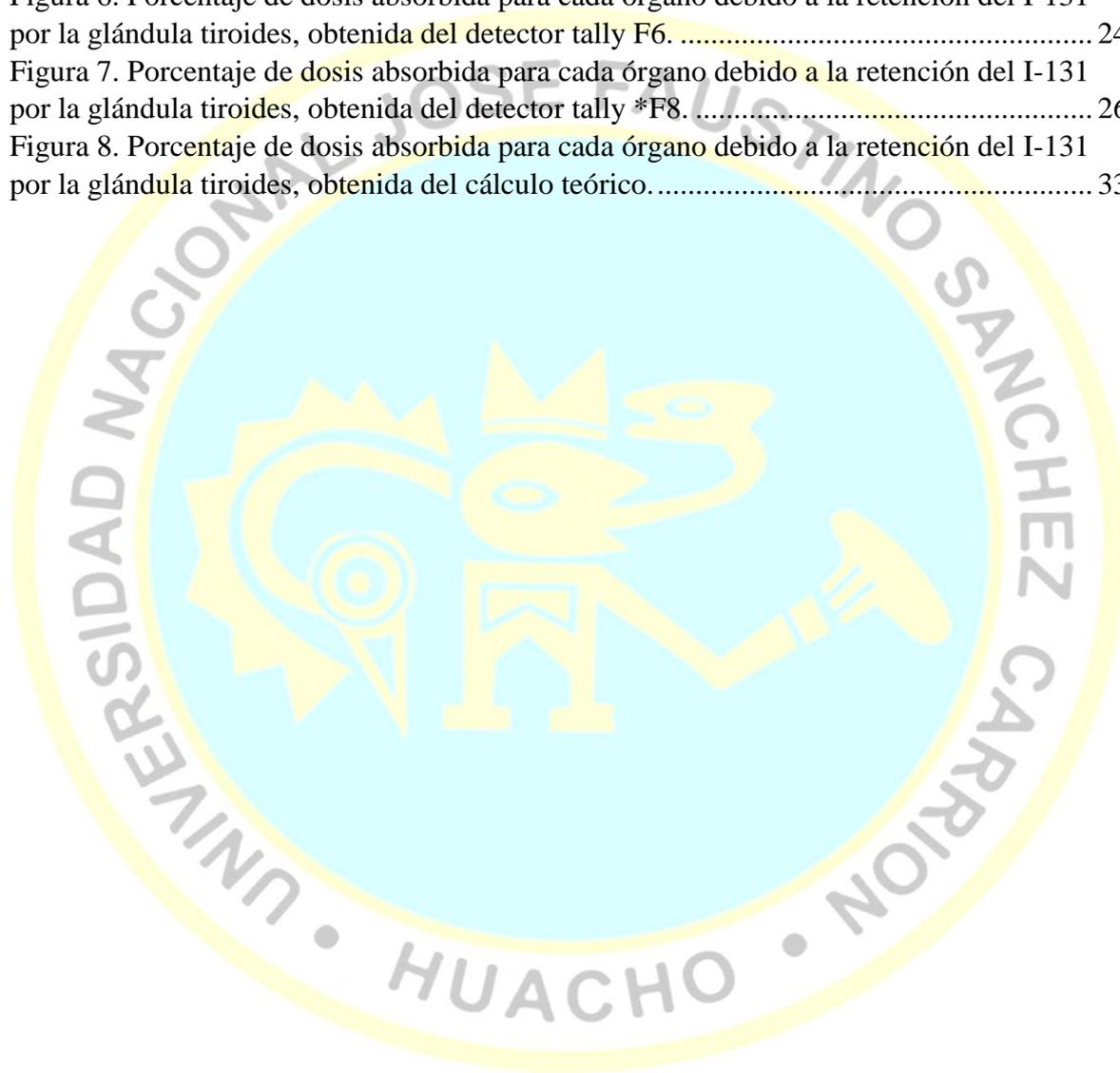
## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 .....	10
Tabla 2 .....	19
Tabla 3 .....	22
Tabla 4 .....	23
Tabla 5 .....	25
Tabla 6 .....	28
Tabla 7 .....	31
Tabla 8 .....	34
Tabla 9 .....	36
Tabla 10 .....	37
Tabla 11 .....	38



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de decaimiento del $^{131}\text{I}$ . (Alba, 2015) .....	9
Figura 2. Fantoma MIRD con adaptaciones al código PENELOPE. (Díaz, 2015).....	12
Figura 3. Características interiores del fantoma MIRD No. 15. (Bouchet et al, 1999).....	13
Figura 4. Representa la historia de un neutrón entrando a una placa de material fisionable. (X-5 Mont Carlo Tean, 2003).....	14
Figura 5. Diagrama experimental para estudiar la atenuación de haz a través de un absorbedor. (Khan & Gibbons, 2014) .....	16
Figura 6. Porcentaje de dosis absorbida para cada órgano debido a la retención del I-131 por la glándula tiroides, obtenida del detector tally F6. ....	24
Figura 7. Porcentaje de dosis absorbida para cada órgano debido a la retención del I-131 por la glándula tiroides, obtenida del detector tally *F8. ....	26
Figura 8. Porcentaje de dosis absorbida para cada órgano debido a la retención del I-131 por la glándula tiroides, obtenida del cálculo teórico.....	33



## RESUMEN

En la siguiente investigación hacemos uso del método Montecarlo mediante el software MCNP5 para medir el nivel de contaminación radiactiva que produce el yodo-131 en la glándula tiroides de los pacientes del área de medicina nuclear. Se desarrolló un modelo tridimensional del fantoma MIRD con algunas actualizaciones del fantoma MIRD N°15 para una mujer adulta, incluyendo la mayoría de los órganos aledaños a la glándula tiroides, entre los más importantes los cristalinos. Para comparar los resultados se usaron los resultados que publicó el ICRP 128 utilizando dosimetría interna y el cálculo teórico utilizando la constante gamma de la fuente. De los datos del ICRP 128 el órgano que recibe la mayor radiación es el estómago con  $6.6E(-01)$  mGy/MBq y los que reciben menor radiación son los ovarios con  $1.75E(-02)$  mGy/MBq. Del método Montecarlo se obtuvo que los órganos que reciben mayor radiación según el tally F6 es el cristalino izquierdo con  $5.61E(-01)$  mGy/MBq y el que recibe menor radiación es la vejiga con  $3.93E(-4)$  mGy/MBq, según el tally \*F8 el que recibe mayor radiación es el cristalino derecho con  $5.54E(-01)$  mGy/MBq y el que recibe menor radiación es la vejiga con  $3.96E(-04)$ . Del cálculo teórico se obtuvo que los órganos que reciben mayor radiación son los cristalinos con  $1.74E(-01)$  mGy/MBq y el que recibe menor radiación es la vejiga con  $9.63E(-05)$  mGy/MBq. Se utilizó el software SPSS para demostrar la hipótesis planteada, utilizando la prueba de rangos con signo de wilcoxon concluyendo que el nivel de contaminación radiactiva por yodo-131 está dentro de los límites permitidos, ya que no supera los valores reportados por el ICRP 128.

Palabras clave: Método Montecarlo, MCNP5, contaminación radiactiva, fantoma MIRD, SPSS y yodo-131.

## ABSTRACT

In the following investigation we use the Montecarlo method using the MCNP5 software to measure the level of radioactive contamination produced by iodine-131 in the thyroid gland of patients in the area of nuclear medicine. A three-dimensional model of the MIRD phantom was developed with some updates of the MIRD phantom No. 15 for an adult woman, including most of the organs surrounding the thyroid gland, among the most important the lens. To compare the results, the results published by ICRP 128 using internal dosimetry and the theoretical calculation using the gamma constant of the source were used. From ICRP 128 data, the organ that receives the most radiation is the stomach with  $6.6E(-01)$  mGy/MBq and those that receive the least radiation are the ovaries with  $1.75E(-02)$  mGy/MBq. From the Montecarlo method it was obtained that the organs that receive the most radiation according to the F6 tally is the left lens with  $5.61E(-01)$  mGy/MBq and the one that receives the least radiation is the bladder with  $3.93E(-4)$  mGy/MBq. According to tally \*F8, the one that receives the most radiation is the right lens with  $5.54E(-01)$  mGy/MBq and the one that receives the least radiation is the bladder with  $3.96E(-04)$ . From the theoretical calculation it was obtained that the organs that receive the most radiation are the lenses with  $1.74E(-01)$  mGy/MBq and the one that receives the least radiation is the bladder with  $9.63E(-05)$  mGy/MBq. SPSS software was used to demonstrate the proposed hypothesis, using the Wilcoxon signed range test, concluding that the level of radioactive contamination by iodine-131 is within the permitted limits, since it does not exceed the values reported by ICRP 128.

Keywords: Montecarlo method, MCNP5, radioactive contamination, MIRD phantom, SPSS and iodine-131.

# INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica la neoplasia maligna más común es el cáncer de tiroides, despertando gran interés en todo el mundo debido a que en los últimos treinta años se ha registrado un aumento en su incidencia, afectando con mayor frecuencia a las mujeres. (Vera et al., 2018)

En nuestro país, el cáncer es la primera causa de muerte, en el año 2018 el cáncer de tiroides se encuentra en las cinco neoplasias más frecuentes en las mujeres, con 5.4 % de la población total que padece de cáncer. Por otro lado la tasa de incidencia es de 11.2 por 100 mil personas, incrementándose significativamente en las mujeres. (Vallejos et al., 2020)

La investigación titulada Evaluación de la contaminación radiactiva por yodo(131) con dosimetría interna mediante el método Montecarlo en la clínica San Gabriel-Lima-2019, presenta el análisis del problema relacionado al nivel de contaminación radiactiva por yodo-131 que recibirán los órganos aledaños a la glándula tiroides en el proceso del tratamiento, por otro lado se plantea que la contaminación radiactiva con dosimetría interna mediante el método Montecarlo está dentro de los límites permitidos.

Este estudio está dividido por seis capítulos:

**CAPÍTULO I:** Comprende el planteamiento del problema de la investigación en estudio que contiene la realidad problemática a nivel internacional y nacional, formulación del problema general y específicos, formulación del objetivo general y específicos, la justificación, donde y en qué tiempo se realizó el estudio y por último la viabilidad del estudio.

**CAPÍTULO II:** Consta del Marco Teórico de la investigación que incluye las investigaciones internacionales y nacionales hechas anteriormente; el concepto, obtención y tratamiento con yodo-131; Irradiación y contaminación; el fantoma MIRD; el Método Monte

Carlo; el Software MCNP5, la Tasa de Dosis; Atenuación de un haz de fotones; la definición de algunos términos básicos, la formulación de la hipótesis general y específicas de la investigación, por último el cuadro de operacionalización de variables.

CAPÍTULO III: Muestra la Metodología de la investigación que incluye el tipo, el nivel, el diseño y el enfoque de la investigación; también con que población y muestra se trabajó; la documentación; los software que se usaron para la recolección de datos y para el procesamiento de la información.

CAPÍTULO IV: Comprende los resultados de la simulación hecha en el software MCNP5, los resultados del cálculo teórico; la prueba de moralidad realizada en el software SPSS incluyendo la interpretación de cada uno y la contrastación de hipótesis.

CAPÍTULO V: Consta de las discusiones de este estudio.

CAPÍTULO VI: Comprende las conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado en el estudio realizado debido a cada problema formulado.

Finalizando con las fuentes de indagación o referencias bibliográficas y los anexos.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática

A nivel internacional, en las Américas y en el Perú el cáncer constituye un problema, por su alta mortalidad. En nuestro país ha cobrado importancia ya que va en aumento, ocasionando daños en hombres, mujeres y sus familias debido a esta enfermedad. Según la Vigilancia Epidemiológica del Cáncer, en el Perú esta patología se ha convertido en la segunda causa entre las muertes registradas (Pinillos, 2006).

En la actualidad una de las neoplasias más frecuentes del sistema endocrino es el cáncer de tiroides, ésta patología en Latinoamérica aparece en 9 de cada 100,000 personas por año, afectando en mayor grado a las mujeres. En el Perú se ha reportado el incremento del número de nuevos casos en la población femenina, por cada 100,000 habitantes aumento el 0,0007%. (Vera et al., 2018)

Para el tratamiento de cáncer de tiroides dentro del protocolo se encuentra la administración de yodo radiactivo ( $I^{131}$ ), que consiste en administrar al cuerpo humano este radio-isotopo, para que la glándula tiroidea absorba casi todo el yodo radiactivo dentro de su cuerpo. El principal riesgo que existe en la manipulación del  $I^{131}$  radica en el estado físico-químico que llega a las instalaciones, como su naturaleza en estado particulado o volátil y el proceso oxidativo, coexisten al mismo tiempo con el  $I^{131}$  en estado líquido, las moléculas libres de diyodo radiactivo  $^{131}I_2$  dentro del vial forman enlaces con la molécula de Oxígeno

O<sub>2</sub>, creando así compuestos volátiles radiactivos en el aire de las áreas de preparación (Sánchez, 2016).

Por ende en las áreas de aplicación de I<sup>131</sup>, existe un peligro de incorporación por vía aérea, esto quiere decir que cuando el paciente va a ser tratado con este radio-isotopo inhala una cantidad de material radioactivo, acorde al modelo biocinético del yodo (Sánchez, 2016).

Otro de los principales riesgos se da en el momento que el paciente está siendo tratado, el yodo(131) se localiza en la glándula de tiroides y empieza a emitir partículas  $\beta$  y  $\alpha$ , llegando a los organos aledaños del cuerpo humano. Esto conlleva a la exposición innecesaria de estos órganos, dañándolos de manera involuntaria.

Entonces en este trabajo se va a elaborar una simulación basada en el método Monte Carlo con el código MCNP5 que constará de un algoritmo para calcular la contaminación radiactiva por yodo(131) que recibe cada órgano de los pacientes de Medicina Nuclear a partir de los datos asignados, en esta simulación se ingresara la geometría del fantoma MIRD, el espectro de energía del yodo(131), los materiales que componen cada órgano y los detectores o contadores.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

- ¿Cómo es la contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el Método Montecarlo en la Clínica San Gabriel en el año 2019?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Cómo se calcula la contaminación radiactiva por yodo-131 mediante el cálculo teórico en la Clínica San Gabriel en el año 2019?
- ¿Cómo se calcula la contaminación radiactiva por yodo-131 mediante el método Montecarlo en la Clínica San Gabriel en el año 2019?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo general**

- Determinar la contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el método Montecarlo en la clínica San Gabriel en el año 2019.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar la contaminación radiactiva por yodo-131 utilizando el cálculo teórico en la Clínica San Gabriel en el año 2019.
- Determinar la contaminación radiactiva por yodo-131 mediante el Método Montecarlo en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

### **1.4 Justificación de la investigación**

#### **1.4.1 Justificación Teórica**

Este estudio se justifica de manera teórica, ya que se cuenta con información actualizada y relevante para la elaboración de la investigación. Además, los datos obtenidos se utilizarán como soporte a la clínica para seguir realizando más estudios que conlleven a dar un mejor servicio.

#### **1.4.2 Justificación Práctica**

La investigación propuesta tiene importancia práctica para los pacientes de la clínica San Gabriel, ya que ayudara a contribuir en la solución del problema de la contaminación por radiación interna que existe es los tratamientos a los que son sometidos todos los pacientes del área de Medicina Nuclear.

#### **1.4.3 Justificación Legal**

En la investigación se verificarán las normativas y/o legislaciones, con el objetivo de asegurar y garantizar un buen tratamiento con el yodo-131 a los pacientes de la clínica San Gabriel.

#### **1.4.4 Justificación Social**

La investigación se justifica de manera social, en vista que solucionara el problema de la optimización de la dosis aplicada a los pacientes de la clínica San Gabriel que se tratan con el isótopo radiactivo yodo-131, el cual se corregirá con el estudio planteado.

#### **1.5 Delimitaciones del estudio**

##### **1.5.1 Delimitación Espacial**

Lugar : Clínica San Gabriel

Distrito : San Miguel

Provincia : Lima

Departamento : Lima

##### **1.5.2 Delimitación Temporal**

Meses : Noviembre

Año : 2019

##### **1.5.3 Delimitación Teórica**

Parámetros de la simulación:

- Geometría de la simulación.
- Materiales de la simulación.
- Fuente a simular.
- Contadores (tally).
- Numero de partículas a simular.

Evaluación de la contaminación:

- Comparación de la dosis simulada y la teórica.

#### **1.6 Viabilidad del estudio**

##### **1.6.1 Viabilidad técnica**

Tiene viabilidad debido a que se cuenta con datos técnicos para este tipo de estudios y asimismo el apoyo de las autoridades de la clínica San Gabriel.

### **1.6.2 Viabilidad ambiental**

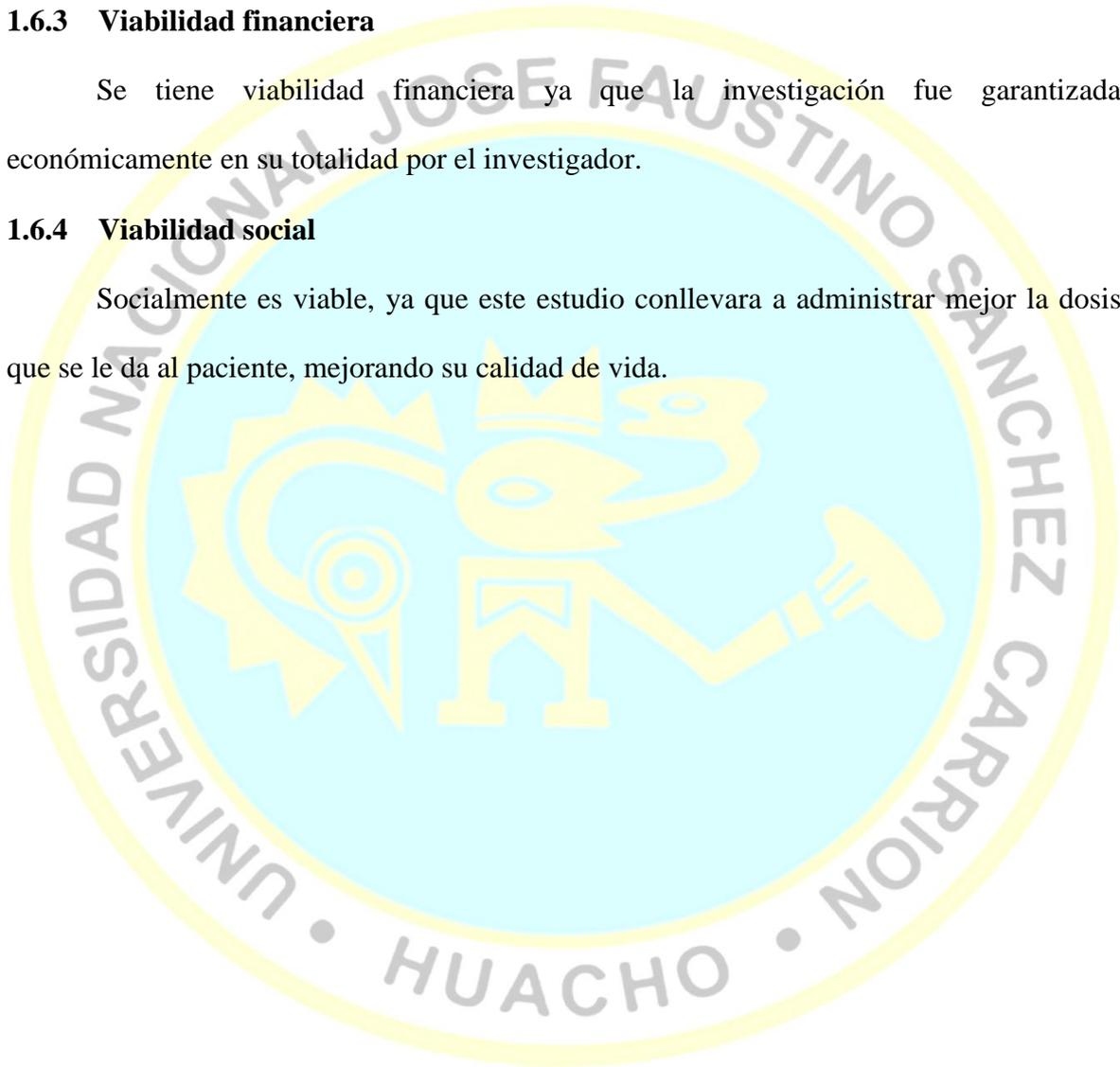
Debido a la naturaleza del estudio, los impactos ambientales serán controlados, debido al estudio que se hará en la simulación y esto conllevará a no estar sometidos a la presencia de una fuente radiactiva real, evitando contaminarse de la radiación que produce el yodo(131).

### **1.6.3 Viabilidad financiera**

Se tiene viabilidad financiera ya que la investigación fue garantizada económicamente en su totalidad por el investigador.

### **1.6.4 Viabilidad social**

Socialmente es viable, ya que este estudio conllevará a administrar mejor la dosis que se le da al paciente, mejorando su calidad de vida.



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1 Investigaciones internacionales**

García M. T; Alfaro L. M. & Ángeles C. M. (2013), realizó el trabajo “Dosimetría interna para personal ocupacionalmente expuesto en Medicina Nuclear”, el objetivo de esta investigación fue realizar el seguimiento de la incorporación de I-131 mediante la dosimetría personal, utilizando una cámara gamma con la que el hospital dispone. La metodología consistió en hacer un fantoma para tiroides que cumple con las normas ANSI, comparándolo con el fantoma RMC-II utilizado en el ININ y el desarrollado en Brasil. El objetivo de esta comparación consistió en hallar las variaciones de la densidad de los materiales y ajustarlos con las mediciones del sistema ACCUSCAN que está calibrado. Luego con una fuente de Ba-133 se irradia al fantoma elaborado por el ININ, midiendo los conteos necesarios con la gamma cámara. En los resultados se determinó las eficacias del conteo para 15 y 20 cm de longitud entre la superficie del fantoma y la plancha de los detectores, también se calculó el límite inferior de detección (LID).

Martínez S. (2010), realizó el trabajo “Estudio Monte Carlo con MCNPX de la Dosimetría de Fotoneutrones Producidos en Aceleradores de uso Clínico, Universidad de Granada- Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear”, el objetivo de esta investigación fue aplicar el método Monte Carlo, simulando en el software MCNPX la producción de fotoneutrones en LINAC de uso clínico, durante tratamientos de radioterapia.

La metodología consistió en estudiar tres equipos (Elekta, Siemens y Varian), trabajando en diferentes salas y con distintas energías. En los resultados se analizó las dificultades relacionadas con la dosimetría física, clínica, personal y ambiental.

### **2.1.2 Investigaciones nacionales**

Chozo F. & Mendoza J. (2017), realizaron el trabajo “Verificación Dosimétrica del Tg-43 para una Fuente de Co-60 de Batd Mediante el Método Monte Carlo (Mcnp) y Medidas Experimentales con Ebt-3, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo”, el objetivo de esta investigación fue verificar el sistema de planificación HDR PLUS para una fuente de Co-60. La metodología consistió en planificar varios puntos de tratamiento en el HDR PLUS, con el objeto de validarlos elaborando una simulación con las mismas condiciones de tratamiento en el software MCNP. Además se verifico haciendo un cálculo teórico con el lenguaje FRONTAN 90 , donde se introdujo el método de cálculo del TG-43 y por último se utilizó películas radiocromicas EBT-3 para validar de manera experimental. En los resultados se obtuvo que el error fue de 0.55% entre el sistema de planificación DHR PLUS y la validación con las películas EBT-3, el error entre la simulación en MCNP y la validación experimental fue de 3.04 %, y el error entre el cálculo teórico hecho en FORTRAN 90 con la validación experimental fue de 0.97 %. Donde concluyeron que el programa hecho en FORTRAN 90 se puede utilizar para verificar de forma independiente el control de calidad del TPS y la simulación realizada en MCNP es recomendable para calcular los valores de dosis en el área de Braquiterapia.

Aguirre, A. (2014), realizo el trabajo “Cálculo de la criticidad en los depósitos de elementos combustibles del reactor nuclear RP-10, Lima”, el objetivo de esta investigación fue realizar los cálculos de criticidad del reactor nuclear de investigación RP-10. La metodología consistió en utilizar el código MCNP5 para calcular la criticidad en los depósitos de elementos combustibles irradiados y no irradiados. En los resultados el factor

de multiplicación efectivo es menor a 0.90, para las circunstancias de acumulación normal e incidental.

Paniagua, R. (2013), realizo el trabajo “Evaluación de dosis radiactiva en neonatos durante su estancia en UCI, Lima”, el objetivo de esta investigación es estimar los niveles de referencia de dosis directa y dispersa cuando los neonatos se exponen a una radiografía de tórax con rayos X en un examen diagnóstico. La metodología consistió en registrar toda la investigación referente al número de exámenes/mes, estancia en UCI y los parámetros de exposición (tensión, corriente del tubo, distancia foco-paciente y tamaño del campo). También se hizo el cálculo de dosis en superficie y en profundidad mediante dosimetría por TLD y un fantoma de agua de forma cilíndrica, estas mismas condiciones fueron simuladas empleando el software MCNP basado en el método Montecarlo.

Pauro L. (2011), realizo el trabajo “Cálculo de flujo neutrónico con MCNP5 en el núcleo 34 del reactor RP-10 con elementos combustibles tipo placa de U3O8-Al de bajo enriquecimiento, Lima”, el objetivo de esta investigación es verificar el modelo computacional del reactor RP-10 comparando los datos obtenidos en el núcleo del reactor sobre la distribución axial del flujo de neutrones térmicos y epitérmicos, La metodología consistió en realizar la medición del flujo con la técnica de irradiación de hojuelas de Au, colocando las sondas de oro en porta muestras que fueron almacenadas en las cajas de irradiación H4, E5 y B4. También se hizo una simulación en el software MCNP5 modelando el núcleo del reactor, la geometría de los porta-muestras y los canales de irradiación. Para reducir el tiempo de cómputo se utilizó simulación en paralelo mediante la interfaz MPICH 1.2.4. En los resultados los datos coinciden con los valores empíricos con un error relativo dentro del 26 %, debido a un desplazamiento en los perfiles hallados y experimentales. Concluyendo que los datos hallados por el método Monte Carlo sirven para calcular el flujo neutrónico en otras lugares de irradiación y diferentes partes del núcleo.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1. El Yodo 131

Saul Hertz y su jefe, J. Howard Means hicieron descubrimientos seminales de la fisiología del yodo en conejos demostrando una captación tiroidea selectiva dentro de los 15 a 30 minutos del 35 al 45% de la forma radiactiva del yodo, excretándose el resto en la orina. Estos descubrimientos permitieron el uso terapéutico del yodo radiactivo de larga duración, el  $^{131}\text{I}$ , en humanos. (Lee, 2012)

El  $^{131}\text{I}$  tiene una vida media de 8.02 días y con cada desintegración radiactiva emite una partícula  $\beta$  (energía media, 191 keV) y rayos  $\gamma$  (energía media, 364 keV). La partícula  $\beta$  tiene masa y choca con núcleos atómicos causando daño, dando como resultado el efecto terapéutico de la destrucción del tejido tiroideo. La trayectoria de las partículas  $\beta$  es menor de 1 mm, por lo tanto el daño no se extiende más allá del lugar donde ocurre la desintegración radiactiva. Los rayos  $\gamma$  atraviesan el tejido y permiten la detección con una cámara  $\gamma$  para crear imágenes. (Lee, 2012)

El esquema de decaimiento del  $^{131}\text{I}$  se visualiza en la siguiente figura.

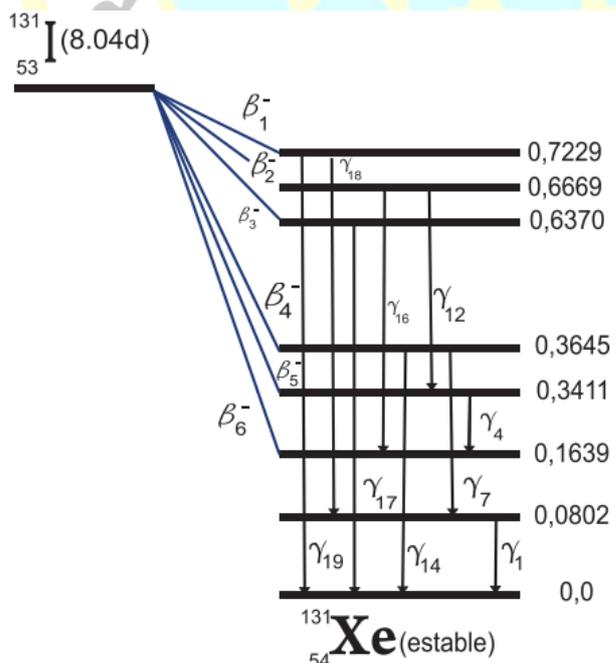


Figura 1. Esquema de decaimiento del  $^{131}\text{I}$ . (Alba, 2015)

El espectro de energías asociadas al esquema de decaimiento del yodo-131 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1

*Espectro de energía asociadas al esquema de decaimiento del <sup>131</sup>I.*

Energía (keV)	Probabilidad de emisión por Bq (%)	Tipo de emisión
247.900	2.100	$\beta_1$
333.800	7.270	$\beta_3$
606.300	89.900	$\beta_4$
80.185	2.607	$\gamma_1$
284.310	6.060	$\gamma_7$
325.789	0.267	$\gamma_{12}$
364.500	81.200	$\gamma_{14}$
503.004	0.359	$\gamma_{16}$
636.990	7.260	$\gamma_{17}$
722.911	1.796	$\gamma_{19}$

Nota: Esta tabla ha sido adaptada de “Medición de límites de descarga para vertimientos generados en Medicina Nuclear” por Alba Martínez L. C., 2015, Colombia.

### 2.2.2. Obtención del radionucleido Yodo 131

La gran parte de los radionúclidos se producen de forma artificial en un reactor nuclear o en un acelerador de partículas, para luego ser utilizados en medicina nuclear. El <sup>131</sup>I se obtiene en un reactor nuclear, cuando se origina la fisión del <sup>235</sup>U de manera automantenida, controlando la proporción de neutrones frenados. Obteniéndose una serie de radionucleidos donde la mayoría son separados y purificados, para ser utilizados en aplicaciones médicas. (Barquero et al., 2014)

### **2.2.3. Tratamiento con Yodo 131**

El tratamiento consiste en darle de tomar una capsula que contiene una dosis de yodo radiactivo “<sup>131</sup>I” al paciente, esta entrara rápidamente en el torrente sanguíneo y luego ira a su tiroides, donde absorberá la mayor parte y el resto que no absorba será eliminado por la orina o excretas dentro de las próximas 24 a 48 h. El yodo radiactivo absorbido por la glándula tiroides permanecerá en su cuerpo durante un largo tiempo, emitiendo partículas  $\beta$  que se dirigirán al tejido tiroideo cancerígeno, produciendo un daño y haciendo que cualquier cáncer muera con el tiempo. Para que este proceso tenga un efecto completo, tomara algunos meses (Alba, 2015).

### **2.2.4. Irradiación y Contaminación**

La diferencia entre irradiación y contaminación se aclara a continuación: Una contaminación, radiactiva o no, se caracteriza por la presencia indeseable de un material en un lugar determinado, donde no debería estar. La irradiación es la exposición de un objeto o cuerpo a la radiación sin contacto directo con la fuente de radiación.

Irradiar, por tanto, no significa contaminar, contaminar con material radiactivo, sin embargo, implica irradiar el lugar donde se encuentra ese material. La irradiación no contamina, pero la contaminación irradia.

Por otro lado, la descontaminación radiológica consiste en remover el contaminante (material indeseable) de la región donde se encuentra. Una vez que se elimina el contaminante radiactivo, no hay más irradiación en el sitio. (Cardoso, 2012)

### **2.2.5. Fantoma MIRD**

Son modelos matemáticos que constan de superficies matemáticas tales como planos, cilindros, esferas, conos, toroides, elipsoides, etc, así como composiciones y subsecciones de éstas con el objetivo de realizar la geometría de los órganos del cuerpo humano con mayor exactitud. La gran mayoría de las estructuras representan al hombre de referencia publicado

en el ICRP Publication 23, cuyas particularidades pertenecen a un hombre de etnia caucásica con una edad de 20-30 años, con una masa de 70 kg y una estatura de 174 cm. (Montenegro, 2018)

El primer maniquí computacional anatómicamente realista recomendado por el MIRD (Medical Internal Radiation Dose) es el fantoma MIRD-5, que incluía veintidós órganos internos. El fantoma estaba compuesto por tres regiones de diferente densidad: el esqueleto con una densidad de  $1.5 \text{ g/cm}^3$ , los pulmones con una densidad de  $0.3 \text{ g/cm}^3$  y el tejido suave para el resto del cuerpo con una densidad de  $1.0 \text{ g/cm}^3$ . (Montenegro, 2018)

En el año 1978 se publica el modelo MIRD-5 mejorado, que contenía las siguientes modificaciones: la cabeza y el cuello se modela con un cilindro elíptico y una media elipse, las piernas se modelan mediante conos circulares truncados, el estómago, los intestinos grueso y delgado son representados como órganos con paredes y contenido interno, por último también se modela la piel. (Montenegro, 2018)

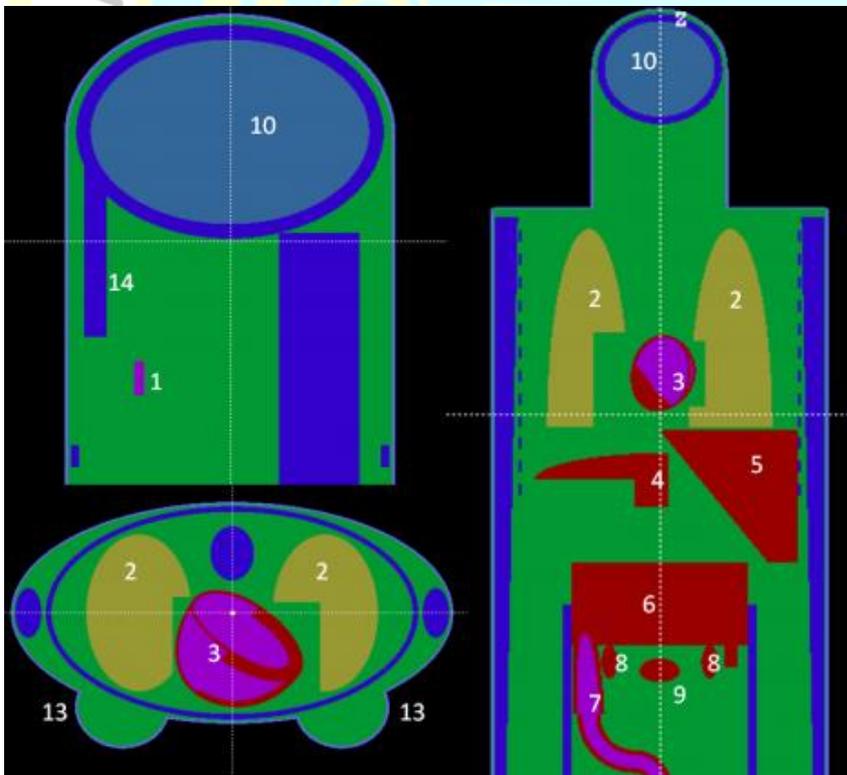


Figura 2. Fantoma MIRD con adaptaciones al código PENELOPE. (Díaz, 2015)

En el año 1999 el comité MIRD adoptó un modelo nuevo, para cabeza-cerebro de un adulto, el fantoma MIRD No. 15, donde las regiones del cuello y la cabeza se modelaron por 21 subregiones (incluyendo piel) que incluían: los ojos, un esqueleto facial mejorado, una columna vertebral de tres regiones y una región distintiva del cuello. Y el cerebro estaba limitado por 8 subregiones que incluían: el tálamo, los núcleos lenticulares (una región compuesta del putamen y el globo pálido), los núcleos caudados, los ventrículos laterales, el tercer ventrículo, el cerebelo, la sustancia blanca y la corteza cerebral. (Bouchet et al, 1999)

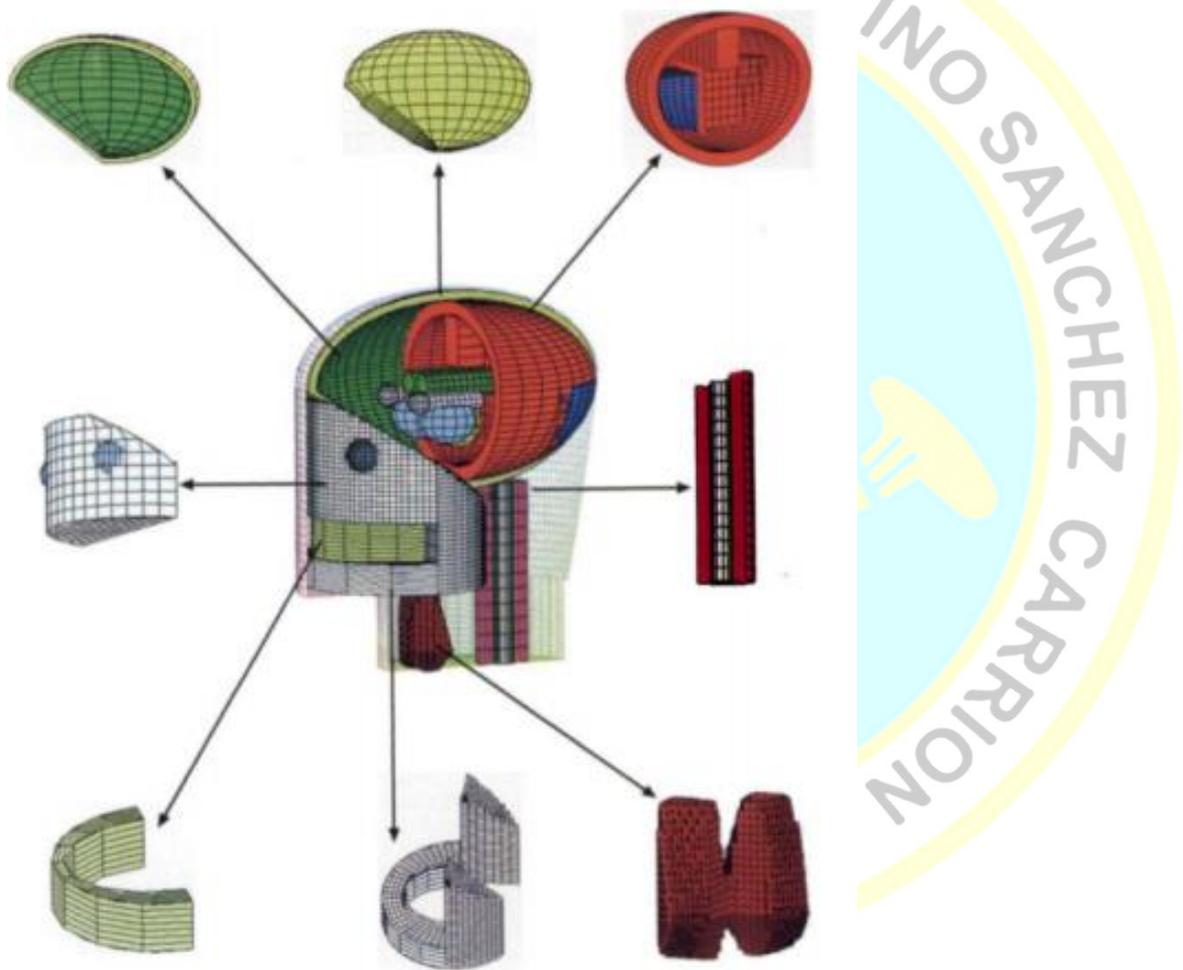


Figura 3. Características interiores del fantoma MIRD No. 15. (Bouchet et al, 1999)

### 2.2.6. El Método Monte Carlo

Método matemático que sigue a cada partícula desde su emisión de una fuente definida hasta que desaparezca, como el escape o la absorción. A cada partícula se le asigna

una distribución de probabilidad para determinar la dirección de la salida en el trayecto de su vida (Leszczynski, 1999).

El método consiste en tomar al azar valores continuos entre 0 y 1 para fijar la interacción y conocer en qué lugar se da, apoyándose en las reglas físicas, las probabilidades que rigen a los procesos y los materiales involucrados en el problema a tratar (Leszczynski, 1999).

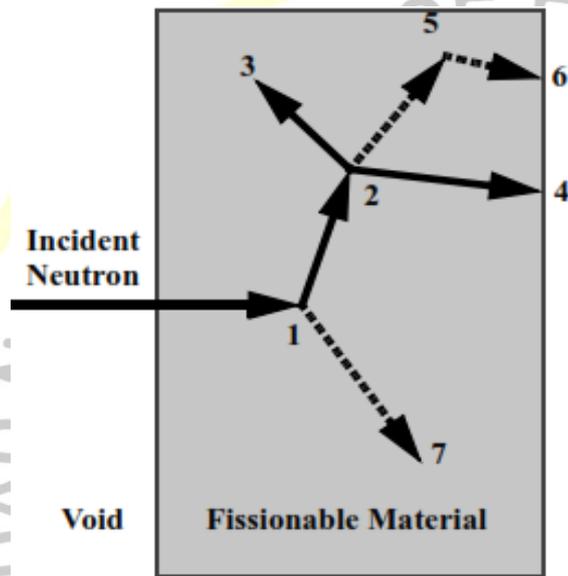


Figura 4. Representa la historia de un neutrón entrando a una placa de material fisionable.

(X-5 Mont Carlo Tean, 2003)

Registro de los eventos que se dan en el material fisionable:

1. El neutrón incide y es dispersado produciendo un fotón.
2. Luego se da la fisión, produciendo un fotón.
3. En la siguiente historia se da la captura del neutrón.
4. Después el neutrón fuga del sistema.
5. El fotón se dispersa.
6. El fotón fuga del sistema.
7. Por último se da la captura del fotón.

### 2.2.7. Software MCNP5

El software de cálculo que utiliza el método Monte Carlo “MCNP”, es uno de los más utilizados en la actualidad, para la simulación del transporte de neutrones, fotones y electrones. En el programa se pueden realizar construcciones geométricas en tres dimensiones, se pueden crear fuentes de criticidad, tener acceso a las librerías de datos nucleares, realizar técnicas de varianza, crear detectores mediante la tarjeta de tally, etc. Todo esto hace que MCNP sea muy utilizada en el área de la física médica, protección radiológica, blindajes de radiación, etc. El código MCNP tiene muchas versiones desde su publicación. En este trabajo usaremos la versión 5, gracias al editor visual podemos tener una mejor visualización de la geometría del fantoma MIRD tanto en dos como en tres dimensiones, ayudándonos en la simulación de nuestro problema. (X-5 Mont Carlo Tean, 2003)

### 2.2.8. Tasa de Dosis

Debido al efecto del cuadrado inverso, la tasa de dosis aumenta rápidamente cuando una persona se acerca a una fuente puntual y disminuye rápidamente cuando la persona se aleja de la fuente. A cualquier distancia “d” de una fuente puntual de actividad “A” y una constante de rayos gamma específica  $\Gamma$  (Vega, 1994); la tasa de dosis viene dada por:

$$\dot{D} = \Gamma \frac{A}{d^2} \quad (1)$$

### 2.2.9. Atenuación de un haz de Fotones

La atenuación de la radiación gamma (fotones) por un absorbente solo puede reducirse en intensidad mediante absorbentes cada vez más gruesos; no se puede absorber por completo (Cember & Jhomson, 2009). En la figura 5, se muestra un dispositivo construido para calcular las diferentes características de atenuación que tiene un haz de fotones.

Se hace incidir un haz estrecho de fotones sobre un absorbente de espesor “x”, el haz es monoenergético. Luego se instala un detector a una distancia fija de la fuente y

adecuadamente lejano del absorbente con el objetivo de medir solo los fotones primarios (Khan & Gibbons, 2014).

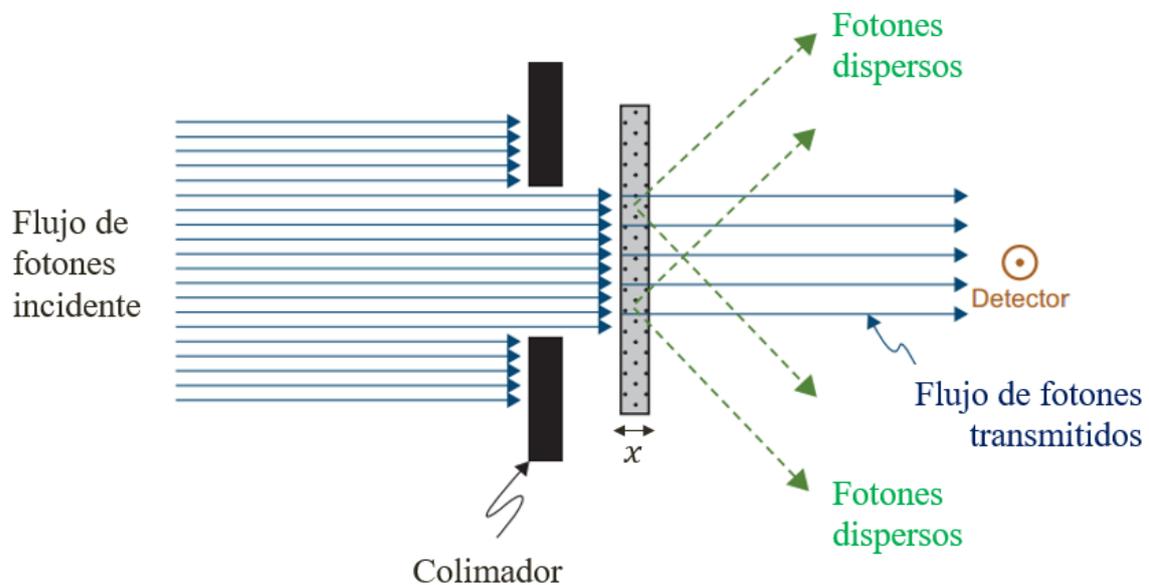


Figura 5. Diagrama experimental para estudiar la atenuación de haz a través de un absorbedor. (Khan & Gibbons, 2014)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

$I_0$ : Intensidad inicial

$I$ : Intensidad final

$\mu$ : Coeficiente de atenuación lineal ( $\text{cm}^{-1}$ )

## 2.3 Definición de términos básicos

### a. Actividad

La definición de la actividad de un material radiactivo es la cantidad de desintegraciones que se dan en el núcleo por unidad de tiempo. Su unidad de medida en el S.I es el Bequerel (Bq), definido como una desintegración por segundo (dps). En radioterapia una unidad más común es el curie (Ci). (Khan & Gibbons, 2014)

### **b. Dosis absorbida**

Es el cociente entre la energía promedio absorbida por la unidad de masa en un punto. Su unidad en el S.I es el gray (Gy), definido como un joule por unidad de kilogramo (J/kg). (Fernández, 2011)

### **c. Dosis equivalente**

Se define como la dosis absorbida ponderada en un órgano o tejido debido a la calidad de la radiación que incide en este. (Sánchez, 2001).

### **d. Dosis efectiva**

Es la sumatoria de todas las Dosis Equivalentes ponderadas en los órganos y tejidos del cuerpo humano. (Sánchez, 2001).

### **e. Error relativo**

El error relativo(R) es definido como una desviación estándar estimada dividida por la medida estimada. R será proporcional a  $1/\sqrt{N}$  donde N es el número de historias. Si queremos reducir a la mitad R, necesitamos aumentar el cuatro veces el número total de historias. El error relativo estimado se utiliza para crear intervalos de confianza sobre el valor de la media estimada, lo que permite realizar una declaración sobre cuál es el verdadero resultado (X-5 Monte Carlo Team, 2003).

### **f. Medicina Nuclear**

La Medicina nuclear es una área de la medicina que usa elementos radiactivos, en forma de fuentes no encapsuladas, para fines de investigación, de diagnósticos y terapéuticos (Puchal, 2014).

### **g. Radiofármaco**

Está definido como “Un producto preparado para su uso con finalidad terapéutica o diagnóstica que contenga uno o más radionucleidos”. El radiofármaco está compuesto por el radionucleido y el fármaco, conocido como fracciones:

a) El radionucleido: Fracción que emite la radiación que es detectada por el instrumento de diagnóstico (gammacámara, PET).

b) El fármaco: Fracción química, orgánica o inorgánica, que establece la biodistribución del radiofármaco hasta el órgano diana (Barquero, 2014).

#### **h. Radioprotección ambiental**

Al momento de trabajar con fuentes no encapsuladas conlleva a tener riesgos de contaminación superficial y ambiental, también en la separación de las agujas de inyección para prevenir problemas de pinchazos ocasionales con riesgo biológico y contar con envases que deben estar plomados para su mantenimiento antes de ser tratados como residuos. (Puchal, 2014).

### **2.4 Hipótesis de investigación**

#### **2.4.1 Hipótesis general**

- La contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el método Montecarlo está dentro de los límites permitidos en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

#### **2.4.2 Hipótesis específicas**

- La contaminación radiactiva por yodo-131 calculada de manera teórica es menor que la medida calculada mediante dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.
- La contaminación radiactiva por yodo-131 se calcula por procedimientos estocásticos mediante el método Montecarlo es menor que la medida calculada por dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

## 2.5 Operacionalización de las variables

Tabla 2

*Título del proyecto: Evaluación de la contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el método Montecarlo en la clínica San Gabriel-Lima-2019.*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores
Variable de caracterización (métodos de evaluación)	X-5 Monte Carlo Team (2003) nos menciona que el software de cálculo que utiliza el método Monte Carlo "MCNP", es uno de los más utilizados en la actualidad, para la simulación del transporte de neutrones, fotones y electrones. En el programa se pueden realizar construcciones geométricas en tres dimensiones, se pueden crear fuentes de criticidad, tener acceso a las librerías de datos nucleares, realizar técnicas de varianza, crear detectores mediante la tarjeta de tally, etc.	En MCNP5, se puede instruir para que haya varios registros como la corriente de partículas, flujo de partículas, y la deposición de energía, que están relacionadas con la dosis absorbida. Estos resultados van acompañados de un segundo número que es el error relativo.	Calculo teórico	Dosis por actividad
			Método Montecarlo	Geometría Materiales Fuente Tally F6 Tally *F8 Dosis por actividad
Variable de interés (Evaluación de la contaminación radiactiva por yodo(131))	Walter F. V. (2011) nos menciona que el yodo(131) es un elemento radioisótopo artificial inestables que emite radiación espontáneamente como beta, gamma, es muy versátil. Tiene una vida media muy corta de ocho días.	El nivel de contaminación interna en el personal se calcula usando dosimetría interna, con el objetivo de observar que estos no superen el límite de dosis.	Nivel de contaminación	Comparación de dosis por actividad

## **CAPÍTULO III METODOLOGÍA**

### **3.1 Diseño metodológico**

El tipo de investigación es aplicada, porque a través de conocimientos adquiridos respecto a la variable de caracterización y la variable de interés se buscara conocer la relación existente entre ellas.

El nivel es de tipo descriptivo.

El diseño es de tipo no experimental de corte transversal.

Enfoque mixto, porque se utilizan en las mediciones de las variables asociadas (datos cualitativos-categoricos) y de variables de supervisión (datos cuantitativos-numéricos).

### **3.2 Población y muestra**

#### **3.2.1 Población**

Fantoma del área de Medicina Nuclear en la clínica San Gabriel en el año 2019.

#### **3.2.2 Muestra**

Órganos del fantoma a simular con el software MCNP5 en el área de Medicina Nuclear en la clínica San Gabriel en el año 2019.

### **3.3 Técnicas de recolección de datos**

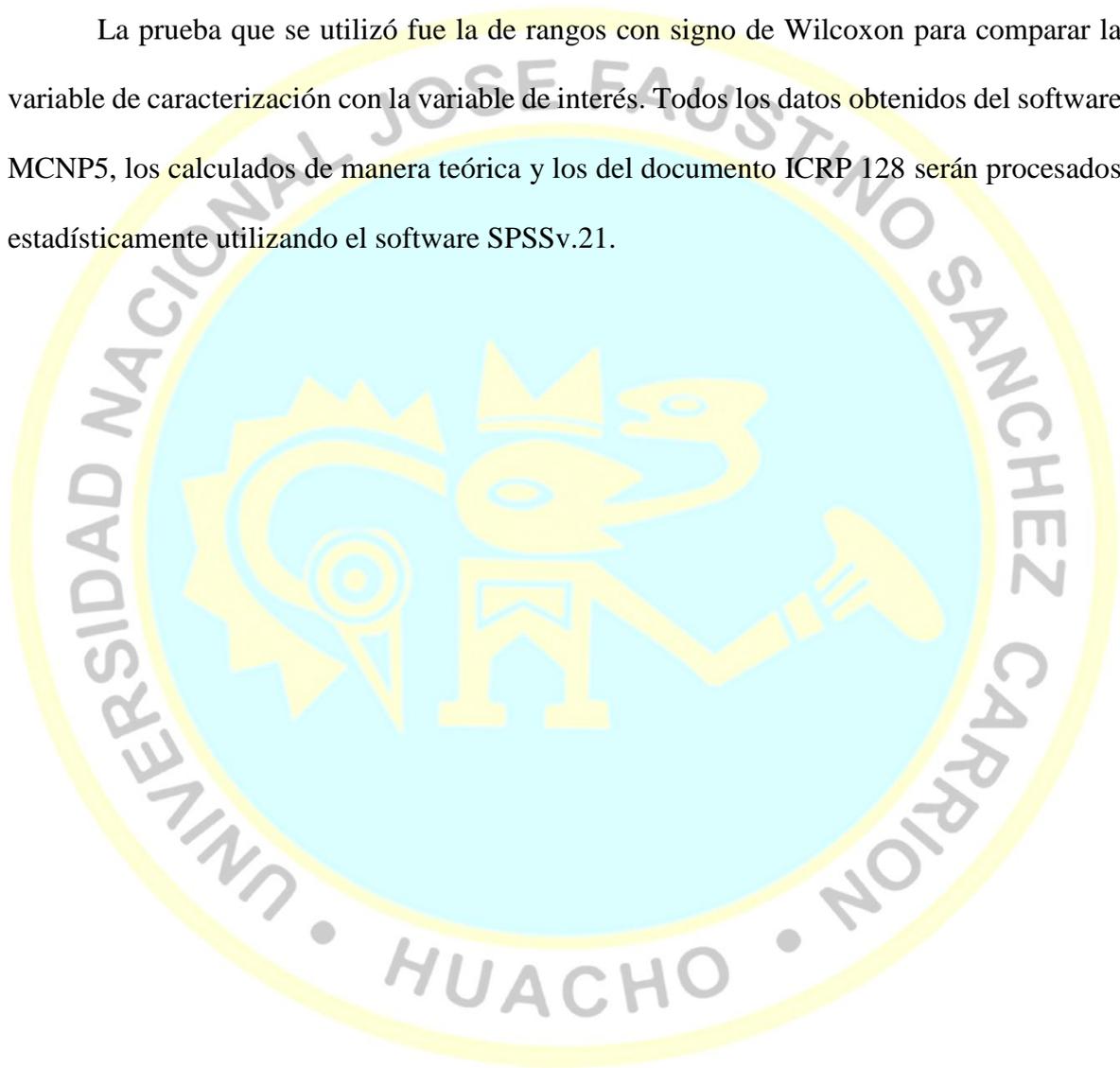
De acuerdo a la investigación se utilizaran las técnicas:

- Documentación: Porque se utilizara libros especializados para la determinación de la contaminación por radiación.

- Observación: Para la medición de la contaminación por radiación se harán observaciones usando el software MCNP5, ayudándonos a obtener datos sobre la contaminación interna por radiación que están recibiendo los órganos aledaños a la glándula tiroides.

### **3.4 Técnicas para el procesamiento de la información**

La prueba que se utilizó fue la de rangos con signo de Wilcoxon para comparar la variable de caracterización con la variable de interés. Todos los datos obtenidos del software MCNP5, los calculados de manera teórica y los del documento ICRP 128 serán procesados estadísticamente utilizando el software SPSSv.21.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de resultados

##### 4.1.1. Resultados de la simulación hecha en MCNP5

Para esta simulación se realizó un archivo de entrada, donde se ingresó la geometría del fantoma MIRD usando superficies matemáticas, con un total de 29 celdas se le ingresó a cada uno la composición de los materiales y su densidad. El cálculo de la dosis absorbida se realizó en los órganos aledaños a la glándula tiroides, en total fueron 20 órganos donde se realizó esta medición. Se simuló  $2 \times 10^8$  partículas con una fuente volumétrica de yodo(<sup>131</sup>) que emitía partículas  $\beta$  y  $\alpha$ , esta fuente tiene la forma de la geometría de la glándula tiroides, cuyos datos se consiguieron en el tiempo mostrado en la tabla 3.

Tabla 3

*Tiempo en días que el computador se demoró en simular  $2 \times 10^8$  historias.*

Modelo del computador	Tiempo de computo (días)
Core-i5 de 1.8 GHz	16.89

Nota: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por el software MCNP5 están acompañados de un valor numérico, que es el error relativo estimado, interpretándose como la calidad de confianza que tienen los datos. Este valor debe ser menor a 0.1 o menor al 10% para que los datos sean aceptables.

El software MCNP5 tiene dos detectores para medir la dosis absorbida en cada órgano; los detectores tally F6 con unidades de MeV/g y el tally \*F8 con unidades de MeV.

Para el detector tally F6, en el archivo de entrada se ingresaron las masas de los órganos donde se requiere calcular la dosis absorbida. A continuación se muestran los datos obtenidos por este detector para todos los órganos aledaños a la glándula tiroides.

Tabla 4

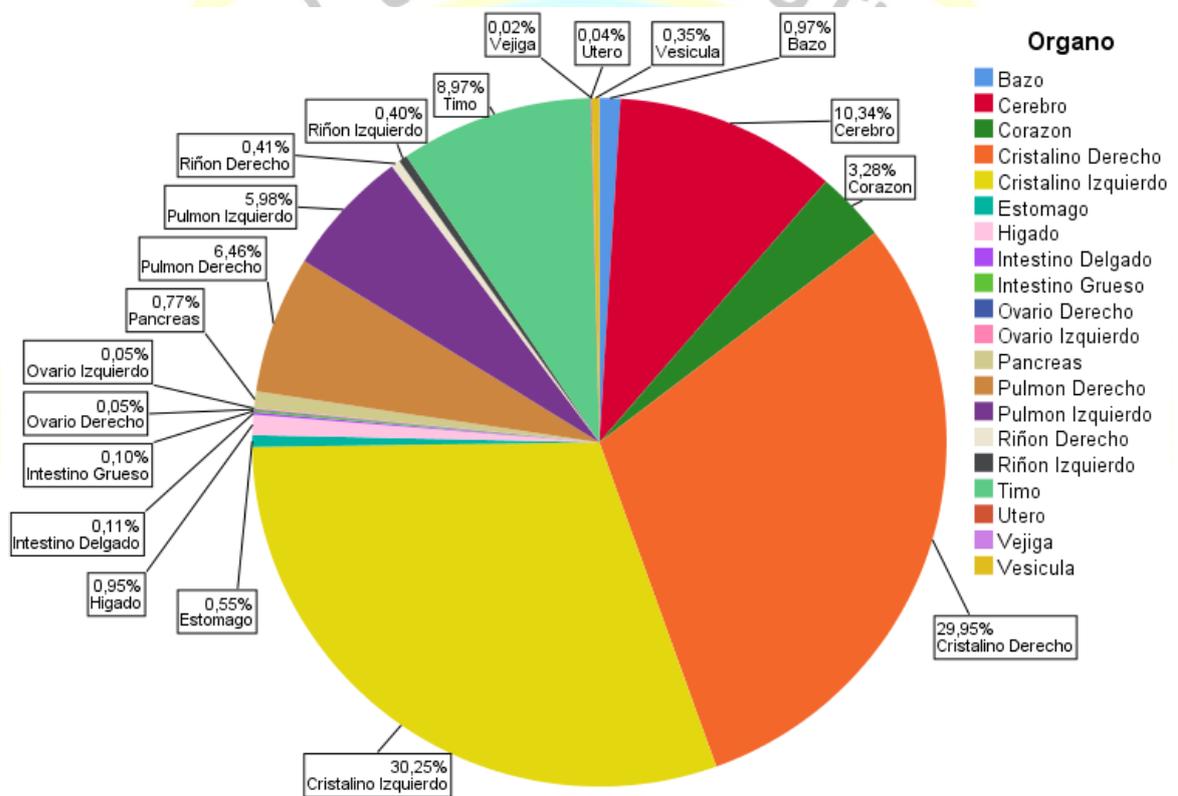
*Resultados de la dosis absorbida mediante el método Monte Carlo obtenidas del detector tally F6.*

Órgano	Tally F6	
	Dosis Absorbida (MeV/g)	Error relativo
Bazo	1.63E-07	0.34%
Cerebro	1.73E-06	0.04%
Corazón	5.48E-07	0.10%
Cristalino Derecho	5.01E-06	0.64%
Cristalino Izquierdo	5.06E-06	0.64%
Estomago	9.21E-08	0.32%
Hígado	1.59E-07	0.13%
Intestino Delgado	1.84E-08	0.41%
Intestino Grueso	1.65E-08	0.49%
Ovario Derecho	8.45E-09	4.99%
Ovario Izquierdo	9.04E-09	4.74%
Páncreas	1.29E-07	0.36%
Pulmón Derecho	1.08E-06	0.05%
Pulmón Izquierdo	1.00E-06	0.05%
Riñón Derecho	6.92E-08	0.52%
Riñón Izquierdo	6.75E-08	0.53%

Timo	1.50E-06	0.21%
Útero	7.19E-09	1.50%
Vejiga	3.54E-09	1.66%
Vesícula biliar	5.82E-08	0.72%

Nota: Elaboración propia.

Figura 6. Porcentaje de dosis absorbida para cada órgano debido a la retención del I-131 por la glándula tiroides, obtenida del detector tally F6.



Nota: Elaboración propia obtenida del SPSS.

### Interpretación

En la figura anterior obtenida del SPSS podemos observar que los órganos más afectados debido a la contaminación radiactiva por I-131 son los que están más cerca de la glándula tiroides, entre ellos: el cristalino izquierdo y derecho con una contaminación del 30.25% y 29.95% respectivamente; luego tenemos al cerebro con 10.34%, el timo con 8.97%, el pulmón derecho e izquierdo con 6.46% y 5.98% respectivamente y el corazón con

3.28%. Los órganos menos afectados debido a que están más alejados de la glándula toroides son: el bazo con 0.97%, el hígado con 0.95%, el páncreas con 0.77%, el estómago con 0.55%, el riñón derecho con 0.41%, el riñón izquierdo con 0.40%, la vesícula con 0.35%, el intestino delgado con 0.11%, el intestino grueso con 0.10%, el ovario derecho con 0.05%, el ovario izquierdo con 0.05%, el útero con 0.04% y la vejiga con 0.02%. Cabe señalar que estos resultados son respecto a la contaminación total que están recibiendo todos los órganos, ya que no se está considerando la contaminación recibida en el tejido adiposo, en la tiroides, en la medula ósea y en la columna vertebral.

Para el detector tally \*F8, fue necesario convertir los datos a dosis absorbida ya que este detector calcula la energía depositada en cada órgano. Estos resultados se dividieron con los valores de masa de cada órgano que se encuentran en el anexo 03.

Tabla 5

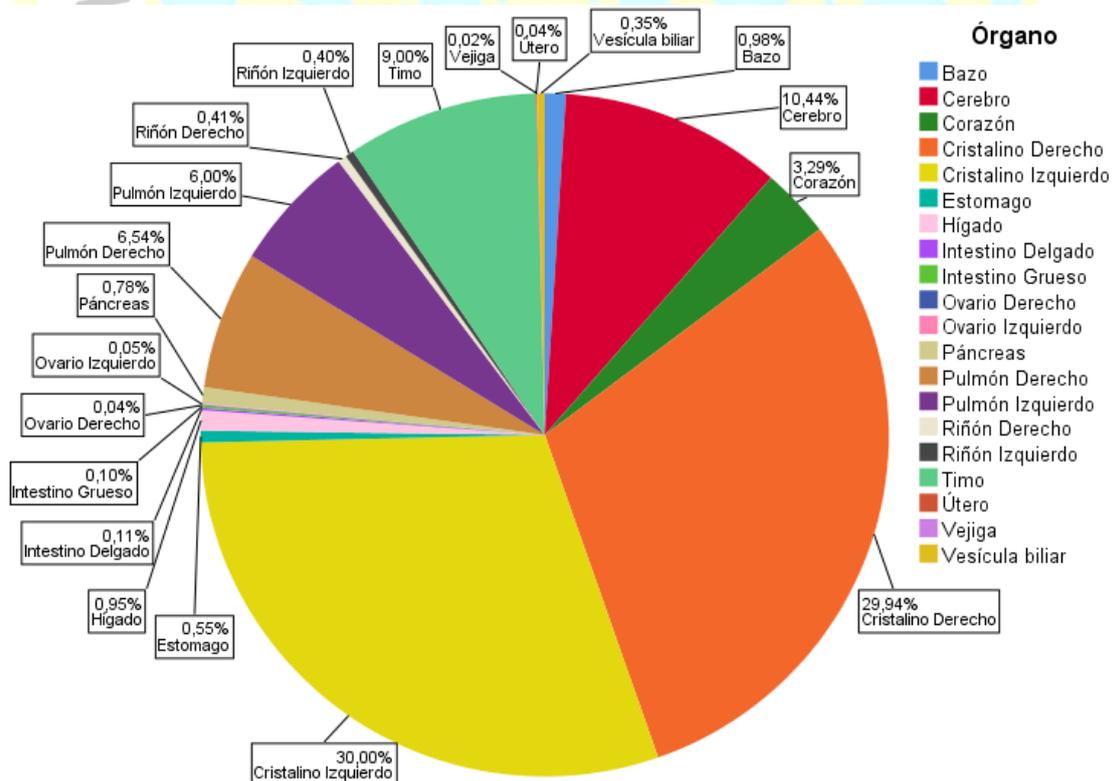
*Resultados de la energía y la dosis absorbida mediante el método Monte Carlo obtenidas del detector tally \*F8.*

Órgano	Tally *F8		
	Energía (MeV)	Error relativo	Dosis Absorbida (MeV/g)
Bazo	3.00E-05	0.50%	1.64E-07
Cerebro	2.46E-03	0.06%	1.74E-06
Corazón	4.22E-04	0.14%	5.49E-07
Cristalino Derecho	9.99E-07	2.73%	4.99E-06
Cristalino Izquierdo	1.00E-06	2.71%	5.00E-06
Estomago	3.82E-05	0.43%	9.15E-08
Hígado	3.04E-04	0.17%	1.59E-07
Intestino Delgado	2.03E-05	0.59%	1.85E-08
Intestino Grueso	1.26E-05	0.72%	1.65E-08

Ovario Derecho	3.22E-08	12.05%	7.40E-09
Ovario Izquierdo	3.70E-08	12.88%	8.50E-09
Páncreas	1.22E-05	0.70%	1.30E-07
Pulmón Derecho	5.43E-04	0.12%	1.09E-06
Pulmón Izquierdo	5.02E-04	0.12%	1.00E-06
Riñón Derecho	1.03E-05	0.81%	6.86E-08
Riñón Izquierdo	1.00E-05	0.82%	6.71E-08
Timo	3.13E-05	0.47%	1.50E-06
Útero	5.50E-07	3.19%	6.96E-09
Vejiga	9.23E-07	2.70%	3.57E-09
Vesícula biliar	3.83E-06	1.24%	5.78E-08

Nota: Elaboración propia.

Figura 7. Porcentaje de dosis absorbida para cada órgano debido a la retención del I-131 por la glándula tiroides, obtenida del detector tally \*F8.



Nota: Elaboración propia obtenida del SPSS.

## Interpretación

En la figura anterior obtenida del SPSS podemos observar que los órganos más afectados debido a la contaminación radiactiva por I-131 son los que están más cerca de la glándula tiroides, entre ellos: el cristalino izquierdo y derecho con una contaminación del 30% y 29.94% respectivamente; luego tenemos al cerebro con 10.44%, el timo con 9%, el pulmón derecho e izquierdo con 6.54% y 6% respectivamente y el corazón con 3.29%. Los órganos menos afectados debido a que están más alejados de la glándula tiroides son: el bazo con 0.98%, el hígado con 0.95%, el páncreas con 0.78%, el estómago con 0.55%, el riñón derecho con 0.41%, el riñón izquierdo con 0.40%, la vesícula biliar con 0.35%, el intestino delgado con 0.11%, el intestino grueso con 0.10%, el ovario derecho con 0.05%, el ovario izquierdo con 0.04%, el útero con 0.04% y la vejiga con 0.02%. Cabe señalar que estos resultados son respecto a la contaminación total que están recibiendo todos los órganos, ya que no se está considerando la contaminación recibida en el tejido adiposo, en la tiroides, en la medula ósea y en la columna vertebral.

Los resultados de dosis absorbida obtenida del método Monte Carlo se multiplicaron por el número desintegraciones que emite la fuente de I-131. Ya que el resultado obtenido por el software MCNP5 es la probabilidad con la que una partícula deje su energía en una celda (Chozo & Mendoza, 2017). Luego estos datos se convirtieron en unidades de miligray con el objetivo de compararlos con los datos que menciona el reporte ICRP 128 y los obtenidos haciendo el cálculo teórico:

$$D = Tally \left( \frac{\text{MeV}}{g} \right) \times N$$

$$D = Tally \left( \frac{\text{MeV}}{g} \times \frac{1.602 \times 10^{-13} \text{ J}}{1 \text{ MeV}} \times \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \times N$$

$$D = 1.602 \times 10^{-10} Tally \left( \text{Gy} \times \frac{1 \text{ mGy}}{10^{-3} \text{ Gy}} \right) \times N$$

$$D = 1.602 \times 10^{-7} Tally (\text{mGy}) \times N$$

Enseguida se convirtieron los datos a dosis absorbida por unidad de actividad administrada, reemplazando  $N = A(Bq) \times t(s)$ , donde el tiempo es 8.02 días, la vida media del I-131:

$$D = 1.602 \times 10^{-7} \text{ Tally (mGy)} \times A(Bq) \times t(s)$$

$$\frac{D}{A} = 1.602 \times 10^{-7} \times t(s) \times \text{Tally (mGy)}$$

$$\frac{D}{A} = 1.602 \times 10^{-7} \times \left(8.02 \text{ días} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}\right) \times \text{Tally (mGy)}$$

$$\frac{D}{A} = 1.602 \times 10^{-7} \times 8.02 \times 24 \times 3600 \times \text{Tally} \left( \text{mGy} \cdot \text{s} \times \frac{10^6 \text{ s}^{-1}}{1 \text{ MBq}} \right)$$

$$\frac{D}{A} = 1.602 \times 8.02 \times 24 \times 360 \times \text{Tally} \left( \frac{\text{mGy}}{\text{MBq}} \right)$$

$$\frac{D}{A} = 1.11 \times 10^5 \times \text{Tally} \left( \frac{\text{mGy}}{\text{MBq}} \right)$$

Utilizando la ecuación anterior se hizo la conversión de los datos obtenidos en la simulación por los detectores F6 y \*F8, para cada uno de los órganos.

Tabla 6

*Resultados de la dosis absorbida por unidad de actividad mediante el método Monte Carlo obtenidas por los detectores tally F6 y el tally \*F8.*

Órgano	Dosis absorbida por unidad de actividad	
	$\left(\frac{\text{mGy}}{\text{MBq}}\right)$	
	Tally F6	Tally *F8
Bazo	1.81E-02	1.82E-02
Cerebro	1.92E-01	1.93E-01
Corazón	6.08E-02	6.09E-02
Cristalino Derecho	5.56E-01	5.54E-01
Cristalino Izquierdo	5.61E-01	5.55E-01

Estomago	1.02E-02	1.02E-02
Hígado	1.77E-02	1.77E-02
Intestino Delgado	2.05E-03	2.05E-03
Intestino Grueso	1.84E-03	1.84E-03
Ovario Derecho	9.38E-04	8.22E-04
Ovario Izquierdo	1.00E-03	9.44E-04
Páncreas	1.43E-02	1.44E-02
Pulmón Derecho	1.20E-01	1.20E-01
Pulmón Izquierdo	1.11E-01	1.11E-01
Riñón Derecho	7.68E-03	7.61E-03
Riñón Izquierdo	7.49E-03	7.45E-03
Tímo	1.67E-01	1.66E-01
Útero	7.98E-04	7.73E-04
Vejiga	3.93E-04	3.96E-04
Vesícula biliar	6.46E-03	6.42E-03

Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior podemos observar que los resultados obtenidos tanto por el detector F6 y \*F8 tienen un gran parecido, variando en las centésimas o décimas. Se calculó el error porcentual entre los valores obtenidos por los detectores y se obtuvo un valor menor al 1%, concluyéndose así, que los dos detectores son muy buenos para realizar el cálculo de la dosis absorbida.

#### 4.1.2. Resultados del cálculo teórico

Para el cálculo teórico se supuso que los órganos y la fuente de I-131 son puntuales; esta fuente se ubica en la tiroides, en el punto (0 cm; -1.077 cm; 72.5 cm). Se utilizó la ecuación (1) para calcular la dosis absorbida por unidad de actividad administrada, donde el

factor gamma de la fuente de I-131 es 2.42 cGy cm<sup>2</sup>/h mCi (Vega et al., 2006) y la distancia media entre la tiroides y los órganos aledaños se encuentran en el anexo 2.

$$\dot{D} = \Gamma \frac{A}{d^2}$$

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{\Gamma}{d^2}$$

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{2.42}{d^2} \left( \frac{\text{cGy cm}^2}{\text{h.mCi}} \right)$$

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{2.42}{d^2} \left( \frac{\text{cGy cm}^2}{\text{h.mCi}} \times \frac{10^{-2} \text{ Gy}}{1 \text{ cGy}} \times \frac{1 \text{ mGy}}{10^{-3} \text{ Gy}} \right)$$

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{2.42 \times 10}{d^2} \left( \frac{\text{mGy cm}^2}{\text{h.mCi}} \times \frac{1 \text{ mCi}}{37 \text{ MBq}} \right)$$

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{2.42 \times 10}{37d^2} \left( \frac{\text{mGy cm}^2}{\text{h.MBq}} \right)$$

Como la distancia media entre la fuente y el órgano está en cm, podemos simplificar:

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{2.42 \times 10}{37(d(\text{cm}))^2} \left( \frac{\text{mGy cm}^2}{\text{h.MBq}} \right)$$

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{2.42 \times 10}{37d^2 \cdot \text{cm}^2} \left( \frac{\text{mGy cm}^2}{\text{h.MBq}} \right)$$

$$\frac{\dot{D}}{A} = \frac{2.42 \times 10}{37d^2} \left( \frac{\text{mGy}}{\text{h.MBq}} \right)$$

Reemplazamos  $\dot{D} = D/t$ , donde el tiempo es 8.02 días, la vida media del I-131:

$$\frac{D}{t \times A} = \frac{2.42 \times 10}{37d^2} \left( \frac{\text{mGy}}{\text{h.MBq}} \right)$$

$$\frac{D}{A} = \frac{2.42 \times 10}{37d^2} \times t \times \left( \frac{\text{mGy}}{\text{h.MBq}} \right)$$

$$\frac{D}{A} = \frac{2.42 \times 10}{37d^2} \times 8.02 \text{ días} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \left( \frac{\text{mGy}}{\text{h.MBq}} \right)$$

$$\frac{D}{A} = \frac{2.42 \times 10}{37d^2} \times 8.02 \times 24 \times \left( \frac{\text{mGy}}{\text{MBq}} \right) \quad (3)$$

La ecuación (3) muestra la dosis absorbida por actividad en el vacío, como el cuerpo humano está compuesto por tejido cuyo coeficiente de atenuación lineal es  $0.09 \text{ cm}^{-1}$  (Vega et al., 2006), podemos utilizar la ley de atenuación de la ecuación (2), donde el espesor del medio que atraviesan los fotones es la longitud media entre la glándula tiroides y los órganos aledaños:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{A}\right)_{Medio} &= \left(\frac{D}{A}\right)_{Vacio} e^{-\mu d} \\ \left(\frac{D}{A}\right)_{Medio} &= \frac{24.2 \times 8.02 \times 24}{37d^2} \times e^{-0.09d} \left(\frac{mGy}{MBq}\right) \\ \left(\frac{D}{A}\right)_{Medio} &= \frac{125.89}{d^2} \times e^{-0.09d} \left(\frac{mGy}{MBq}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la dosis absorbida por unidad de actividad para los órganos aledaños a la glándula tiroides. Se consideró para el reporte de la medida, 3 cifras significativas con el objetivo de poder realizar las comparaciones con los otros cálculos.

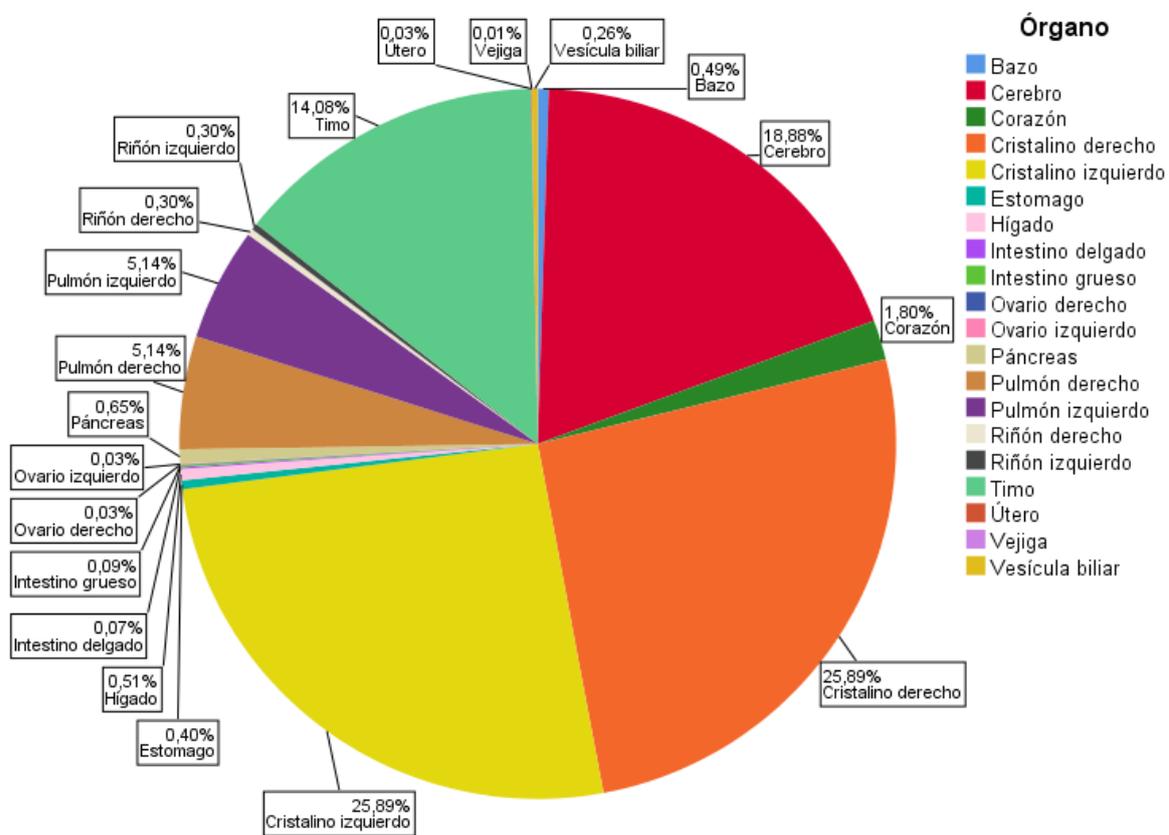
Tabla 7  
*Resultados obtenidos del cálculo teórico de la dosis absorbida por unidad de actividad del I-131 retenido en la glándula tiroides.*

Órgano	Dosis absorbida por unidad de actividad
	$\left(\frac{mGy}{MBq}\right)$
Bazo	3.29E-03
Cerebro	1.27E-01
Corazón	1.21E-02
Cristalino derecho	1.74E-01
Cristalino izquierdo	1.74E-01
Estomago	2.69E-03

Hígado	3.44E-03
Intestino delgado	4.91E-04
Intestino grueso inferior	8.87E-05
Intestino grueso superior	5.31E-04
Ovario derecho	2.18E-04
Ovario izquierdo	2.18E-04
Páncreas	4.37E-03
Pulmón derecho	3.45E-02
Pulmón izquierdo	3.45E-02
Riñón derecho	1.98E-03
Riñón izquierdo	1.98E-03
Timo	9.43E-02
Útero	1.97E-04
Vejiga	9.63E-05
Vesícula biliar	1.71E-03

Nota: Elaboración propia.

Figura 8. Porcentaje de dosis absorbida para cada órgano debido a la retención del I-131 por la glándula tiroides, obtenida del cálculo teórico.



Nota: Elaboración propia obtenida del SPSS.

### Interpretación

En la figura anterior obtenida del SPSS podemos observar que los órganos más afectados debido a la contaminación radiactiva por I-131 son los que están más cerca de la glándula tiroides, entre ellos: el cristalino izquierdo y derecho con una contaminación del 25.89% cada uno; luego tenemos al cerebro con 18.88%, el timo con 14.08%, el pulmón derecho e izquierdo con 5.14% cada uno y el corazón con 1.8%. Los órganos menos afectados debido a que están más alejados de la glándula tiroides son: el bazo con 0.49%, el hígado con 0.51%, el páncreas con 0.65%, el estómago con 0.4%, el riñón derecho e izquierdo con 0.3% cada uno, la vesícula biliar con 0.26%, el intestino delgado con 0.07%, el intestino grueso con 0.09%, el ovario derecho e izquierdo con 0.03% cada uno, el útero con 0.03% y la vejiga con 0.01%. Cabe señalar que estos resultados son respecto a la

contaminación total que están recibiendo todos los órganos, ya que no se está considerando la contaminación recibida en el tejido adiposo.

#### 4.1.3. Prueba de normalidad

**H1:** Los datos analizados de la dosis absorbida por unidad de actividad obtenidos del método Montecarlo, el cálculo teórico y dosimetría interna (ICRP 128) no siguen una distribución normal.

**H0:** Los datos analizados de la dosis absorbida por unidad de actividad obtenidos del método Montecarlo, el cálculo teórico y dosimetría interna (ICRP 128) siguen una distribución normal.

Tabla 8

*Prueba de normalidad para los datos obtenidos del tally F6, del tally \*F8, del ICRP 128 y del cálculo teórico.*

Indicadores	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Dosis absorbida por unidad de actividad obtenidas del tally F6	0.69	18	5.9E-05
Dosis absorbida por unidad de actividad obtenidas del tally *F8	0.69	18	6.0E-05
Dosis absorbida por unidad de actividad obtenidas del ICRP 128	0.75	18	2.9E-04
Dosis absorbida por unidad de actividad obtenidas del cálculo teórico	0.56	18	3.0E-06

Nota: Elaboración propia obtenida del SPSS.

#### Interpretación

Para la prueba de normalidad se utilizó el test de Shapiro-Wilk, ya que la muestra es menor a 30 datos. El valor de “p” que arrojo la prueba para la dosis absorbida por unidad de

actividad para el tally F6 es  $5.9E-05$ , para el tally \*F8 es  $6.0E-05$ , para el ICRP 128 es  $2.9E-04$  y para el cálculo teórico es  $3.0E-06$ ; estos valores son menores a 0.05, rechazándose la hipótesis nula y aceptándose la hipótesis alternativa. Podemos concluir que todos los datos analizados no siguen una distribución normal, esto nos obliga a utilizar pruebas no paramétricas como la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon. Se utiliza esta prueba porque tenemos dos variables cuantitativas y es el equivalente a la prueba “t”, cuando los datos siguen una distribución normal.

## 4.2 Contrastación de hipótesis

### Hipótesis general

Se desea demostrar que la hipótesis para procesos estadísticos es:

**HG:** La medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el método Montecarlo está dentro de los límites permitidos en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

### Hipótesis específicas

#### Primera hipótesis:

**H1:** La medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 calculada de manera teórica es menor que la medida calculada mediante dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

**H0:** La medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 calculada de manera teórica no es menor que la medida calculada mediante dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

Para el cálculo de la dosis absorbida por unidad de actividad mediante el método de dosimetría interna se tomaron los datos que publicó el ICRP en su reporte N° 128, para una fuente de I-131. Estos datos se encuentran en el anexo 3. Mencionamos también que solo se analizaron 18 datos ya que en el reporte mencionado anteriormente no se calculó la dosis absorbida por unidad de actividad en los cristalinos.

Tabla 9

*Estadísticos descriptivos y prueba de rangos con signo de Wilcoxon para la dosis absorbida por unidad de actividad obtenida por cálculo teórico y dosimetría interna.*

Dosis absorbida por unidad de actividad	Estadísticos descriptivos			Prueba de rangos con signo de Wilcoxon
	N	Media	Desviación	
Obtenidas del cálculo teórico	18	1.79	3.58	Z=-3.73
Obtenidas del ICRP 128	18	15.32	16.59	p=1.95E-04

Nota: Elaboración propia obtenida del SPSS.

### **Interpretación**

Podemos concluir que con un 95% de confiabilidad y un nivel de significancia del 5% se obtuvo que el valor de p es 0.000195, debido a la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, este valor es menor a 0.05, rechazando la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alternativa. Concluyendo que la medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 calculada de manera teórica es menor que la medida calculada mediante dosimetría interna por lo que el nivel de contaminación interna está dentro de los límites permitidos en la Clínica San Gabriel en el año 2019. Esto se debe a que la dosis absorbida por unidad de actividad obtenida por el método teórico tienen una media igual a  $1.79 \frac{mGy}{MBq}$  que es menor a los datos obtenidos de la dosimetría interna con una media de  $15.32 \frac{mGy}{MBq}$ . Aclaremos que los datos obtenidos por el cálculo teórico no son muy precisos ya que este método considera que la fuente de yodo(131) y los órganos son puntos, además considera que todo el cuerpo está compuesto por el mismo material. Esto conlleva a tener una medida menor a lo que en verdad

se debería de registrar, ya que estaría faltando la medida de las demás partes que componen al órgano.

**Segunda hipótesis:**

**H1:** La medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 calculada por procedimientos estocásticos mediante el método Montecarlo es menor que la medida calculada mediante la dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

**Ho:** La medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 calculada por procedimientos estocásticos mediante el método Montecarlo no es menor que la medida calculada mediante la dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

Tabla 10

*Estadísticos descriptivos y prueba de rangos con signo de Wilcoxon para la dosis absorbida por unidad de actividad obtenida por el tally F6 y dosimetría interna.*

Dosis absorbida por unidad de actividad	Estadísticos descriptivos			Prueba de rango con signo de Wilcoxon
	N	Media	Desviación	
Obtenidas del Tally F6	18	4.11	6.23	Z= -2.94
Obtenidas del ICRP 128	18	15.32	16.59	P= 3.0E-03

Nota: Elaboración propia obtenida del SPSS.

**Interpretación**

Podemos concluir que con un 95% de confiabilidad y un nivel de significancia del 5% se obtuvo que el valor de p es 0.003, debido a la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, este valor es menor a 0.05, rechazando la hipótesis nula y se aceptando la hipótesis alternativa. Concluyendo que la medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 calculada por procedimientos estocásticos mediante el método Montecarlo es menor que la medida calculada mediante la dosimetría interna por lo que el nivel de contaminación interna

está dentro de los límites permitidos en la Clínica San Gabriel en el año 2019. Esto se debe a que la dosis absorbida por unidad de actividad obtenida por el tally F6 tienen una media igual a  $4.11 \frac{mGy}{MBq}$  que es menor a los datos obtenidos de la dosimetría interna con una media de  $15.32 \frac{mGy}{MBq}$ .

Tabla 11

*Estadísticos descriptivos y prueba de rangos con signo de Wilcoxon para la dosis absorbida por unidad de actividad obtenida por el tally \*F8 y dosimetría interna.*

Dosis absorbida por unidad de actividad	Estadísticos descriptivos			Prueba de rango con signo de Wilcoxon
	N	Media	Desviación	
Obtenidas del Tally *F8	18	4.11	6.23	Z= -2.94
Obtenidas del ICRP 128	18	15.32	16.59	P= 3.0E-03

Nota: Elaboración propia obtenida del SPSS.

### **Interpretación**

Podemos observar que los resultados obtenidos por la prueba de rangos con signos de Wilcoxon para el tally F6 y \*F8 son iguales, esto se debe a que los datos obtenidos por el software tienen una diferencia muy pequeña que varía en la centésimas.

Por lo tanto podemos asegurar que con el 95% de confiabilidad y un nivel de significancia del 5% de acuerdo a la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, la medida de la contaminación radiactiva por yodo-131 calculada por procedimientos estocásticos mediante el método Montecarlo es menor que la medida calculada mediante la dosimetría interna por lo que el nivel de contaminación interna está dentro de los límites permitidos en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

#### 5.1 Discusión de resultados

De los resultados obtenidos, aceptamos la hipótesis alternativa general que establece que la contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el método Montecarlo está dentro de los límites permitidos en la Clínica San Gabriel en el año 2019.

Estos datos tienen relación con lo que sostiene Vega et al. (2006) y Arcos et al. (2007), quienes señalan que el órgano que recibe menor dosis absorbida por unidad de actividad es el útero, y que el cálculo teórico al aplicarle una corrección por el efecto de la absorción de los fotones gamma en el cuerpo humano arroja un resultado menor a la dosis absorbida por unidad de actividad obtenida por el método Montecarlo. Esto es acorde con lo que en esta investigación se halla.

Pero, en lo que no coincide el estudio de Arcos et al. (2007) con el nuestro, es que ellos mencionan que al utilizar el método Montecarlo el timo recibe la mayor dosis absorbida por unidad de actividad mientras que en nuestro estudio se encontró que los cristalinos reciben la mayor dosis y esto se debe a que se añadió los órganos mencionados, siendo el timo en este estudio el cuarto órgano que recibe más dosis absorbida en comparación con los demás.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

Se presentan las siguientes conclusiones de las pruebas realizadas:

- **Conclusión general:** En esta tesis se determinó que el nivel de la contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el método Montecarlo en la clínica San Gabriel en el año 2019, está dentro de los límites permitidos. Lo más importante que se encontró fue que el método Montecarlo predice mejor los resultados que el método teórico. Esto se debe a que el método Montecarlo considera la geometría de los órganos y de la fuente, los materiales que componen el cuerpo humano y la distribución volumétrica del I-131 de emitir la radiación gamma de manera isotrópica.
- **Conclusión específica 1:** En esta tesis se determinó que la contaminación radiactiva por yodo-131 utilizando el cálculo teórico en la Clínica San Gabriel en el año 2019, es menor que la obtenida por dosimetría interna. Esto se debe a que los órganos y la fuente se consideraron de forma puntual, excluyendo la geometría de los órganos; además no se consideró los diferentes elementos que componen el cuerpo humano.
- **Conclusión específica 2:** En esta tesis se determinó que la contaminación radiactiva por yodo-131 mediante el Método Montecarlo en la Clínica San Gabriel en el año 2019, es menor que la obtenida por dosimetría interna. Lo más importante que se encontró fue que los datos obtenidos del detector tally F6 y el tally \*F8 tienen una

diferencia en las centésimas, concluyendo que los dos detectores son excelentes para el cálculo de la dosis absorbida.

## 6.2 Recomendaciones

- Diseñar un fantoma vóxel del cuerpo humano utilizando el software MCNP5 con el objetivo de tener mayor exactitud en el cálculo de la dosis absorbida en los órganos.
- Para la prescripción de la dosis se recomienda utilizar el método Montecarlo en comparación con el cálculo teórico ya que arroja mejores resultados de la dosis absorbida. Con esto el físico médico del hospital puede dar indicaciones más precisas sobre la radiación que les está llegando a los pacientes.
- No recomendamos utilizar el cálculo teórico ya que los órganos son considerados como un punto, y al momento de calcular la dosis absorbida estaremos cometiendo un error ya que cada órgano tiene una geometría. Por ejemplo uno de los órganos donde más error se vio al calcular la dosis fue en el intestino delgado y el intestino grueso ya que estos se expande por casi toda la parte abdominal y al ser considerados como puntos, llevo a cometer este error en el cálculo de la dosis.
- Utilizar simulación en paralelo, con el objetivo de obtener en menos tiempo los resultados que nos arroja el software MCNP5. Mientras más computadoras o laptop estén conectados en esta configuración, más rápido se obtendrán los valores.
- Realizar una comparación de la dosis absorbida obtenida por el método Montecarlo con la dosis obtenida mediante la experimentación y adicionalmente compararlo con los valores que nos da el ICRP 128.

## REFERENCIAS

### 7.1 Fuentes documentales

- Aguirre, A. (2014). *Cálculo de la criticidad en los depósitos de elementos combustibles del reactor nuclear RP-10*. Lima.
- Alba Martínez, L. C. (2015). *Medición de límites de descarga para vertimientos generados en Medicina Nuclear*. Colombia.
- Asadi, S., Vaez-Zadeh, M., Masoudi, F., Rahmani, F., Knaup, C., & Meigooni, A. (8 de April de 2015). Gold nanoparticle-based brachytherapy enhancement in choroidal melanoma using a full Monte Carlo model of the human eye. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 16(5).
- Bouchet, L., Bolch, W., Weber, D., Atkins, H., & Boston, J. (March de 1999). MIRD Pamphlet No. 15: Radionuclide S Values in a Revised Dosimetric Model of the Adult Head and Brain. *The Journal of Nuclear Medicine*, 40(3).
- Chozo Tuñoque, F., & Mendoza Moreno, J. d. (2017). *Verificación dosimétrica del TG-43 para una fuente de Co-60 de BATD mediante el Método de Monte Carlo (MCNP) y medidas experimentales con EBT-3*. Lambayeque.
- Díaz Londoño, G. M. (2015). *Cálculo Monte carlo de fracciones de absorción específicas mediante el código PENELOPE*. Universidad de Granada.
- García M. T., & Ángeles C. M. (2013). *Dosimetría interna para personal ocupacionalmente expuesto en Medicina Nuclear*. México.
- ICRP. (2003). *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values (ICRP 89)* (Vol. 32). PERGAMON.
- ICRP. (2014). *Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: a Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances (ICRP 128)*. SAGE.
- ICRU. (1992). *Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues (ICRU 46)*. Sévres, Francia.
- Lee, S. (2012). *Radioactive iodine therapy* (Vol. 19). Boston, USA.
- Martínez Ovalle, S. A. (2010). *Estudio Monte Carlo con MCNPX de la dosimetría de fotoneutrones producidos en aceleradores de uso clínico*. Granada.
- Montenegro Hernandez, J. A. (2018). *Geometrías antropomórficas en Geant4*. Bogotá, Colombia.
- Paniagua, R. (2013). *Evaluación de dosis radiactiva en neonatos durante su estancia en UCI*. Lima.

Pauro Velásquez, L. M. (2011). *Cálculo de flujo neutrónico con MCNP5 en el núcleo 34 del reactor RP-10 con elementos combustibles tipo placa de U3O8-Al de bajo enriquecimiento*. Lima.

Sánchez Buitrago, M. J. (2016). *Programa piloto de vigilancia radiológica individual (dosimetría interna) en trabajadores ocupacionalmente expuestos a yodo-131 en estado volátil*. Bogotá.

Vega Carrillo, H. R. (1994). Cálculo de los factores gamma para radioisótopos usados en medicina nuclear. *Revista española de Medicina Nuclear*, 5.

Vega Carrillo, H. R., Manzanares Acuña, E., Hernández Dávila, V., & Arcos Pichardo, A. (2006). *Dosis en el Útero de una Mujer, con Tres Meses de Embarazo, debido al I-131 acumulado en su glándula tiroides*. Acapulco.

Yoriyaz, H., Sanchez, A., & Dos Santos, A. (2005). A new human eye model for ophthalmic brachytherapy dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 115(1-4), 316-319.

## 7.2 Fuentes bibliográficas

Barquero Sanz, R. e. (2014). *Medicina Nuclear: Bases físicas, equipos y control de calidad* (Vol. 6). España.

Cardoso, E. d. (2012). *A Energia Nuclear* (3era edicao ed.). Rio de Janeiro.

Cember, H., & Jhomson, T. (2009). *Introduction to health physics* (Fourth edition ed.). McGraw-Hill Companies.

Khan, F., & Gibbons, J. (2014). *The physics of radiation therapy* (Five edition ed.). Philadelphia.

Leszczynski, F. (1999). *Curso avanzado de entrenamiento en el manejo del programa MCNP4B*. Bariloche.

X-5 Mont Carlo Team. (2003). *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*. California.

## 7.3 Fuentes hemerográficas

Pinillos Ashton, L. (2006). *Cancer en el Perú: retos para el milenio*. Lima.

Vallejos Sologuren, C., Aguilar Cartagena, A., & Flores Flores, C. (2020). *Situación del cáncer en el Perú* (Vol. 59(2)). Perú.

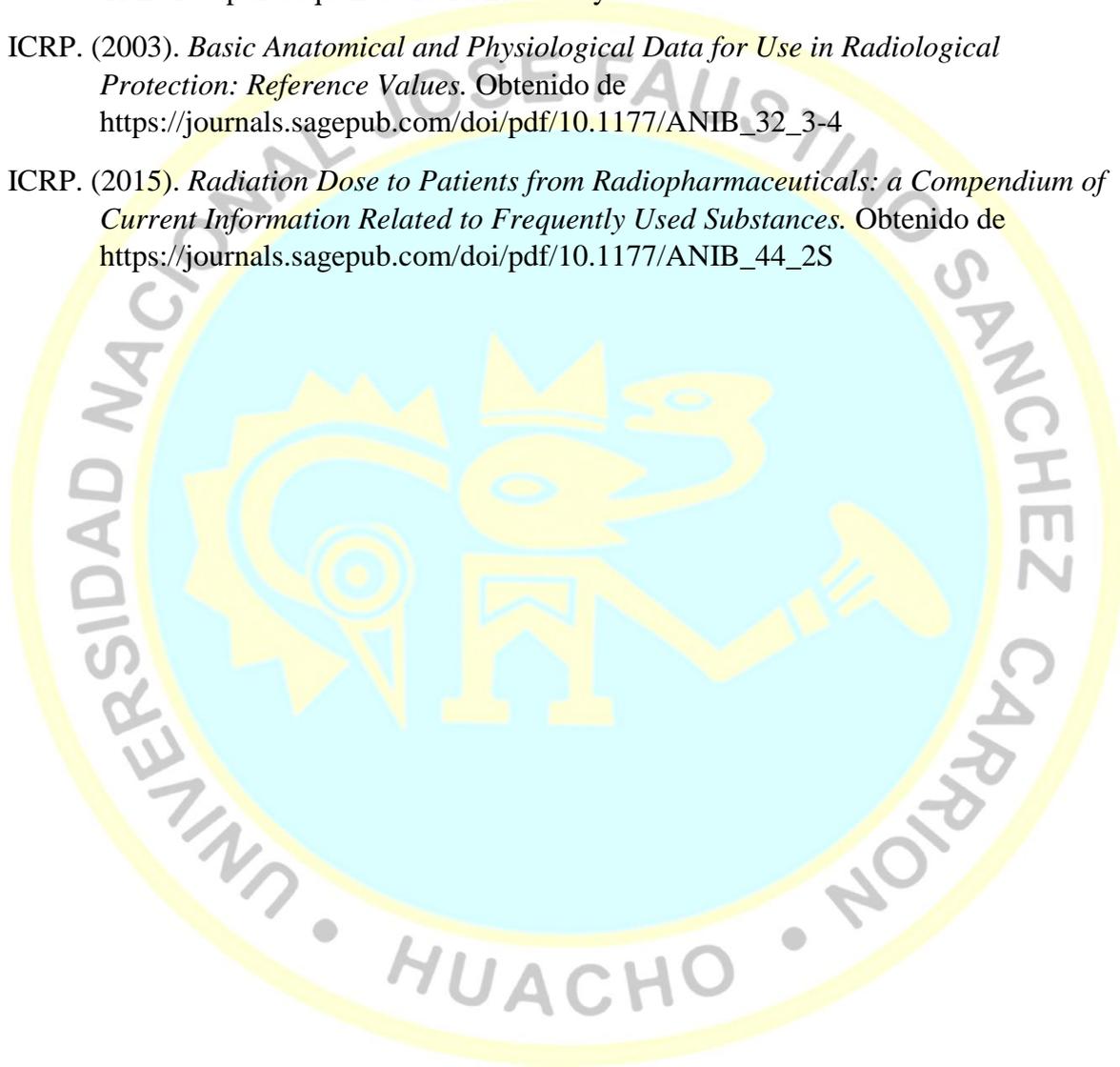
Vera Muthre, E., Lazo Caicedo, C., Cedeño Loor, S., & Bravo Bemeo, C. (2018). *Actualización sobre el cancer de tiroides*. Saberes del conocimiento.

#### 7.4 Fuentes electrónicas

Chozo Tuñoque, F., & Mendoza Moreno, J. d. (2017). *Verificación dosimétrica del TG43 para una fuente de Co60 de BATD mediante el método Monte Carlo (MCNP) y medias experimentales con EBT3*. Obtenido de <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/1362/BC-TESTMP-197.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ICRP. (2003). *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values*. Obtenido de [https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB\\_32\\_3-4](https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_32_3-4)

ICRP. (2015). *Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: a Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances*. Obtenido de [https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB\\_44\\_2S](https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_44_2S)



## ANEXOS

### ANEXO 1. Composición química de tejidos y órganos para adultos (% por masa).

Órgano o Tejido	H	C	N	O	Na	P	S	Cl	K	Otros
Bazo	10.3	11.3	3.2	74.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	-
Cerebro	10.7	14.5	2.2	71.2	0.2	0.4	0.2	0.3	0.3	-
Corazón	10.4	13.9	2.9	71.8	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	-
Cristalinos	9.6	19.5	5.7	64.6	0.1	0.1	0.3	0.1	-	-
Esqueleto de la columna vertebral	7.0	28.7	3.8	43.7	-	5.1	0.2	0.1	0.1	Ca 11.1, Mg 0.1, Fe 0.1
Estomago	10.6	11.5	2.2	75.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	-
Hígado	10.3	18.6	2.8	67.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	-
Intestino delgado y grueso	10.6	11.5	2.2	75.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	-
Medula ósea roja	10.5	41.4	3.4	43.9	-	0.1	0.2	0.2	0.2	Fe 0.1
Ojos	9.6	19.5	5.7	64.6	0.1	0.1	0.3	0.1	-	-
Ovarios	10.5	9.3	2.4	76.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-
Páncreas	10.6	16.9	2.2	69.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	-
Pulmones	10.3	10.5	3.1	74.9	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	-
Riñones	10.3	13.2	3.0	72.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	Ca 0.1
Tejido Blando	10.6	31.5	2.4	54.7	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	-
Timo	10.5	25.6	2.7	60.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	-
Útero	10.6	31.5	2.4	54.7	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	-
Vejiga	10.5	9.6	2.6	76.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	-
Vesícula biliar	10.5	25.6	2.7	60.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	-

Nota: Esta tabla ha sido adaptada de los reportes ICRP 89 y el ICRU 46.

**ANEXO 2. Valores de las densidades, masas y distancias medias de los órganos.**

Órgano o Tejido	Densidad ( $g/cm^3$ )	Masa ( $g$ )	Distancia (cm)
Bazo	1.06	183	37.00
Cerebro	1.04	1420	15.62
Corazón	1.03	770	28.43
Cristalinos	1.07	0.4	14.21
Esqueleto de la columna vertebral	1.30	-	-
Estomago	1.04	418	38.40
Hígado	1.05	1910	36.70
Intestino delgado	1.04	1100	51.00
Intestino grueso inferior	1.04	310	64.73
Intestino grueso superior	1.04	452	50.40
Medula ósea roja	2.30	-	-
Ojos	1.03	-	-
Ovarios	1.05	8.71	57.40
Páncreas	1.05	94.3	35.05
Pulmones	0.25	1000	22.23
Riñones	1.05	299	40.60
Tejido Blando	1.03	-	-
Timo	1.03	20.9	17.00
Útero	1.04	79	58.20
Vejiga	1.04	64.05	64.05
Vesícula biliar	1.03	66.2	41.65

Nota: Esta tabla ha sido adaptada de los reportes ICRP 89 y el ICRP 128.

**ANEXO 3. Dosis absorbida por unidad de actividad suministrada para una tiroides con alta captación de I-131, con administración oral.**

Dosis absorbida por unidad de actividad suministrada	
Órgano	$\left(\frac{mGy}{MBq}\right)$
Bazo	7.50E-02
Cerebro	1.70E-01
Corazón	1.20E-01
Estomago	6.60E-01
Hígado	1.40E-01
Intestino Delgado	3.20E-02
Intestino Grueso	4.20E-01
Ovario Derecho	1.75E-02
Ovario Izquierdo	1.75E-02
Páncreas	6.80E-02
Pulmón Derecho	7.50E-02
Pulmón Izquierdo	7.50E-02
Riñón Derecho	1.35E-01
Riñón Izquierdo	1.35E-01
Tímo	1.90E-01
Útero	3.80E-02
Vejiga	3.40E-01
Vesícula biliar	4.90E-02

Nota: Esta tabla ha sido adaptada del reporte ICRP 128.

#### ANEXO 4. Matriz de consistencia.

Título: Evaluación de la contaminación radiactiva por yodo-131 con dosimetría interna mediante el método Montecarlo en la clínica San Gabriel-Lima-2019.

Problemas de investigación	Objetivos de investigación	Hipótesis de investigación	Variables de investigación	Dimensión	Indicadores	Metodología de investigación
<p>General</p> <p>¿Cómo es la contaminación radiactiva por yodo(131) con dosimetría interna mediante el Método Montecarlo en la Clínica San Gabriel en el año 2019?</p>	<p>General</p> <p>Determinar la contaminación radiactiva por yodo(131) con dosimetría interna mediante el método Montecarlo en la clínica San Gabriel en el año 2019.</p>	<p>General</p> <p>La contaminación radiactiva por yodo(131) con dosimetría interna mediante el método Montecarlo está dentro de los límites permitidos, en la Clínica San Gabriel en el año 2019.</p>	<p>Variable de caracterización</p> <p>Métodos de evaluación</p>	<p>Cálculo teórico</p> <p>Método monte Carlo</p>	<p>Dosis por actividad</p> <p>Geometría</p> <p>Materiales</p> <p>Fuente</p> <p>Tally F6</p> <p>Tally *F8</p> <p>Dosis por actividad</p>	<p>Tipo de estudio: Aplicada</p> <p>Nivel de investigación: Descriptiva</p> <p>Diseño de estudio: No experimental transversal descriptiva</p>
<p>Específicos</p> <p>1.¿Cómo se calcula la contaminación radiactiva por yodo(131) mediante el cálculo teórico en la Clínica San Gabriel en el año 2019?</p> <p>2.¿Cómo se calcula la contaminación radiactiva por yodo(131) mediante el método Montecarlo en la Clínica San Gabriel en el año 2019?</p>	<p>Específicos</p> <p>1. Determinar la contaminación radiactiva por yodo(131) utilizando el cálculo teórico en la Clínica San Gabriel en el año 2019.</p> <p>2. Determinar la contaminación radiactiva por yodo (131) mediante el Método Montecarlo en la Clínica San Gabriel en el año 2019.</p>	<p>Específicos</p> <p>1.La contaminación radiactiva por yodo(131) calculada de manera teórica es menor que medida calculada mediante dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.</p> <p>2.La contaminación radiactiva por yodo (131) se calcula por procedimientos estocásticos mediante el método Montecarlo es menor que la medida calculada por dosimetría interna en la Clínica San Gabriel en el año 2019.</p>	<p>Variable de interés</p> <p>Evaluación de la contaminación radiactiva por yodo(131)</p>	<p>Nivel de contaminación</p>	<p>Comparación de dosis por actividad</p>	<p>Método de investigación: Mixto: Cualitativa cuantitativa</p> <p>Población y la muestra: Población: Fantoma en el área de Medicina Nuclear en la clínica San Gabriel en el año 2019. Muestra: Órganos del fantoma a simular con el software MCNP5 en el área de Medicina Nuclear en la clínica San Gabriel en el año 2019.</p>

**ANEXO 5. Archivo ingresado en MCNP5.**

C \*\*\*\*\* SIMULACIÓN DE UNA FUENTE DE YODO-131 \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* COLOCANDO COMO ÓRGANO FUENTE LA TIROIDES \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* SE IGNORO EL NÚMERO MÁSCO PORQUE \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* PORQUE SE SIMULO FOTONES \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* INVESTIGADOR: FREDY CHOZO TUÑOQUE \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

1	1 -1.06 -1	imp:p,e=1 \$ BAZO
2	2 -1.05 -2 -3	imp:p,e=1 \$ RIÑÓN DER.
3	2 -1.05 -4 5	imp:p,e=1 \$ RIÑÓN IZQ.
4	3 -1.03 -6	imp:p,e=1 \$ TIMO
5	4 -1.05 (-5 -7 8 -9):(-7 8 9)	imp:p,e=1 \$ PÁNCREAS
6	5 -1.04 -10	imp:p,e=1 \$ ESTOMAGO
7	6 -0.25 -11 13 #(12 14 -15 -16)	imp:p,e=1 \$ PULMÓN DER.
8	6 -0.25 (13 -17 18):(-17 19 -18):(-17 13 -19 20)	imp:p,e=1 \$ PULMÓN IZQ.
9	7 -1.05 -21 -22 23 -24	imp:p,e=1 \$ HÍGADO
10	8 -1.04 -23 -25 26 27 -28 #(-23 -28 -41 42) #21	imp:p,e=1 \$ INTEST. DELG.
11	9 -1.04 -29	imp:p,e=1 \$ VEJIGA
12	10 -4.93 -30:-31:(-32 33 34 -35 -36)	imp:p,e=1 \$ TIROIDES
13	11 -2.3 -37 38 39 -40	imp:p,e=1 \$ MEDULA ÓSEA
14	12 -1.3 38 -40 -41 42 #13 #((-74 73 -41):(-75 -73 -41))	imp:p,e=1 \$ COLUM. VER.

- 15 13 -1.07 -43 imp:p,e=1 \$ CRISTA. DER.
- 16 14 -1.026 (43 -44):(44 -45) imp:p,e=1 \$ OJO DER.
- 17 13 -1.07 -46 imp:p,e=1 \$ CRISTA. IZQ.
- 18 14 -1.026 (46 -47):(47 -48) imp:p,e=1 \$ OJO IZQ.
- 19 15 -1.04 -49 50 #(38 -41 -49) imp:p,e=1 \$ CEREBRO
- 20 16 -1.03 (-51 -52):(52 -53 -54) imp:p,e=1 \$ VESÍCULA
- 21 8 -1.04 (-55 56 -57):(-58 59 -60):(-57 -61 62)  
 :(-5 -63 64 65 -66 67):(5 -62 65 -66 -68 69) imp:p,e=1 \$ INTEST. GRUE.
- 22 17 -1.03 (-70 71):(70 71 -72 -73):(-71 73 -74)  
 :(-71 -73 -75) imp:p,e=1 \$ CORAZÓN
- 23 18 -1.04 -76 77 imp:p,e=1 \$ ÚTERO
- 24 19 -1.05 -78 imp:p,e=1 \$ OVARIO DER.
- 25 19 -1.05 -79 imp:p,e=1 \$ OVARIO IZQ.
- 26 20 -1.03 ((-80 81 -82):(82 -83 -84):(84 -85):(-81 -86 87 10 29)  
 :(-87 -88 89):(-87 89 -90)) #1 #2 #3 #4 #5 #7 #8 #9  
 #10 #12 #13 #14 #15 #16 #17 #18 #19 #20 #21 #22 #23 #24  
 #25 imp:p,e=1 \$ CUERPO
- 27 21 -0.001205 -112 113 -114 115 -116 117 29 10 #1 #2 #3  
 #4 #5 #7 #8 #9 #10 #12 #13 #14 #15 #16 #17  
 #18 #19 #20 #21 #22 #23 #24 #25 #26 imp:p,e=1 \$ CUARTO DE MN
- 29 0 112:-113:114:-115:116:-117 imp:p,e=0 \$ UNIVERSO
- 1 sq 0.081632653061224 0.25 0.0277777777777778 0 0 0 -1 11 3 37
- 2 sq 0.049382716049383 0.4444444444444444 0.033057851239669 0 0 0 -1 -6 6 32.5
- 3 px -3

4 sq 0.049382716049383 0.444444444444444 0.033057851239669 0 0 0 -1 6 6 32.5  
5 px 3  
6 sq 0.444444444444444 1.5624999534339 0.0625 0 0 0 -1 0 -7.3 57  
7 sq 0.00390625 0.69444438925496 0.091827367208377 0 0 0 -1 -1 0 37  
8 px -1  
9 pz 37  
10 sq 0.0625 0.111111111111111 0.015625 0 0 0 -1 8 -4 35  
11 sq 0.04 0.017777777777778 0.001736111111111 0 0 0 -1 -8.5 0 43.5  
12 px -5.4  
13 pz 43.5  
14 pz 46  
15 pz 54  
16 py 1.5  
17 sq 0.04 0.017777777777778 0.001736111111111 0 0 0 -1 8.5 0 43.5  
18 px 8  
19 pz 55  
20 py 1  
21 sq 64 272.25 0 0 0 0 -17424 0 0 0  
22 p 1935 1505 -1575 -67725  
23 pz 27  
24 pz 43  
25 c/z 0 -3.8 11.3  
26 pz 17  
27 py -4.86  
28 py 2.2

29 sq 0.040680560033746 0.08362767754836 0.08362767754836 0 0 0 -1 0 -4.5 8

30 sq 0.82644624516626 0.82644624516626 0.16 0 0 0 -1 -1.404 -1.077 72.5

31 sq 0.82644624516626 0.82644624516626 0.16 0 0 0 -1 1.404 -1.077 72.5

32 c/z 0 -1.077 1.92

33 c/z 0 -1.077 1.32

34 pz 70.38

35 pz 72.5

36 py -1.077

37 c/z 0 3.41 0.43

38 sq 0.016692373908195 0.01041232779128 0.029726514097187 0 0 0 -1 0 0 88

39 pz 70

40 pz 88

41 sq 2.7889 4.7089 0 0 0 0 -13.13265 0 3.41 0

42 pz 22

43 sq 2.98 9.15 2.98 0 0 0 -1 -3.4 -8.23 84.2

44 s -3.4 -7.5 84.2 1.22

45 sq 1.29 1.52 1.39 0 0 0 -1 -3.4 -8.23 84.2

46 sq 2.98 9.15 2.98 0 0 0 -1 3.4 -8.23 84.2

47 s 3.4 -7.5 84.2 1.22

48 sq 1.29 1.52 1.39 0 0 0 -1 3.4 -8.23 84.2

49 sq 0.022956841802094 0.013520820866497 0.030245746691871 0 0 0 -1 0 0 86.85

50 p 0 6.9 9.8 794.78

51 1 so 2.12

52 1 pz 0

53 1 sq 1 1 -0.05175625 0 0 0.4823 -4.4944 0 0 0

54 1 pz 8

55 c/z -8.5 -2.36 2.5

56 pz 14.45

57 pz 24

58 sq 0 2.25 6.25 0 0 0 -14.0625 0 -2.36 25.5

59 px -10.5

60 px 10.5

61 2 sq 4.5369 3.5344 0 0 0 0 -16.03522 0 0 0

62 pz 8.72

63 c/y 3 0 4.391

64 c/y 3 0 1.609

65 py -1.391

66 py 1.391

67 pz 0

68 c/y 3 8.47 6.862

69 c/y 3 8.47 4.079

70 3 sq 0.013520820866497 0.04 0.10405827903511 0 0 0 -1 0 0 0

71 3 px 0

72 3 sq 0.013520820866497 0.04 0.020408163265306 0 0 0 -1 0 0 0

73 3 pz 0

74 3 sq 0.034293551600779 0.04 0.10405827903511 0 0 0 -1 0 0 0

75 3 sq 0.034293551600779 0.04 0.020408163265306 0 0 0 -1 0 0 0

76 sq 0.14567916895278 0.036699405483858 0.40569594433123 0 0 0 -1 0 -2 14

77 py -4.62

78 sq 1 4 0.25 0 0 0 -1 6 0 15

79 sq 1 4 0.25 0 0 0 -1 -6 0 15

80 c/z 0 1.2 5.81

81 pz 70

82 pz 75.2

83 sq 96.04 59.9076 0 0 0 0 -5753.526 0 0 0

84 pz 88

85 sq 0.016692373908195 0.01041232779128 0.029726514097187 0 0 0 -1 0 0 88

86 sq 100 400 0 0 0 0 -40000 0 0 0

87 pz 0

88 k/z -10 0 -99.75 0.01005018813 1

89 pz -79.8

90 k/z 10 0 -99.75 0.01005018813 1

112 px 250

113 px -250

114 py 250

115 py -250

116 pz 200

117 pz -79.8

TR1 -4.5 -3.2 30 0.9615 0 -0.2748 -0.0574 0.9779 -0.2008 0.2687 0.209 0.9403

\*TR2 8.804869 -1.073298 16.36 2.92248 90 92.922248

TR3 1 -1.8 50 0.6751 -0.4727 -0.5664 -0.464 0.3249 -0.8241 0.5736 0.8191 0

C \*\*\*\*\*TARJETA DATA\*\*\*\*\*

mode p e

C \*\*\*\*\*MATERIALES QUE COMPONEN EL FANTOMA\*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*BAZO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m1 001000 -0.103 \$ HIDROGENO

006000 -0.113 \$ CARBONO

007000 -0.032 \$ NITRÓGENO

008000 -0.741 \$ OXIGENO

011000 -0.001 \$ SODIO

015000 -0.003 \$ FOSFORO

016000 -0.002 \$ AZUFRE

017000 -0.002 \$ CLORO

019000 -0.003 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*RIÑÓN (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m2 001000 -0.103 \$ HIDROGENO

006000 -0.132 \$ CARBONO

007000 -0.030 \$ NITRÓGENO

008000 -0.724 \$ OXIGENO

011000 -0.002 \$ SODIO

015000 -0.002 \$ FOSFORO

016000 -0.002 \$ AZUFRE

017000 -0.002 \$ CLORO

019000 -0.002 \$ POTASIO

020000 -0.001 \$ CALCIO

C \*\*\*\*\*TIMO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m3 001000 -0.105 \$ HIDROGENO

006000 -0.256 \$ CARBONO

007000 -0.027 \$ NITRÓGENO

008000 -0.602 \$ OXIGENO  
011000 -0.001 \$ SODIO  
015000 -0.002 \$ FOSFORO  
016000 -0.003 \$ AZUFRE  
017000 -0.002 \$ CLORO  
019000 -0.002 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*PÁNCREAS (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m4 001000 -0.106 \$ HIDROGENO  
006000 -0.169 \$ CARBONO  
007000 -0.022 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.694 \$ OXIGENO  
011000 -0.002 \$ SODIO  
015000 -0.002 \$ FOSFORO  
016000 -0.001 \$ AZUFRE  
017000 -0.002 \$ CLORO  
019000 -0.002 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*ESTOMAGO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m5 001000 -0.106 \$ HIDROGENO  
006000 -0.115 \$ CARBONO  
007000 -0.022 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.751 \$ OXIGENO  
011000 -0.001 \$ SODIO  
015000 -0.001 \$ FOSFORO  
016000 -0.001 \$ AZUFRE  
017000 -0.002 \$ CLORO

019000 -0.001 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*PULMÓN (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m6 001000 -0.103 \$ HIDROGENO

006000 -0.105 \$ CARBONO

007000 -0.031 \$ NITRÓGENO

008000 -0.749 \$ OXIGENO

011000 -0.002 \$ SODIO

015000 -0.002 \$ FOSFORO

016000 -0.003 \$ AZUFRE

017000 -0.003 \$ CLORO

019000 -0.002 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*HÍGADO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m7 001000 -0.103 \$ HIDROGENO

006000 -0.186 \$ CARBONO

007000 -0.028 \$ NITRÓGENO

008000 -0.671 \$ OXIGENO

011000 -0.002 \$ SODIO

015000 -0.002 \$ FOSFORO

016000 -0.003 \$ AZUFRE

017000 -0.002 \$ CLORO

019000 -0.003 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*INTESTINO DELGADO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m8 001000 -0.106 \$ HIDROGENO

006000 -0.115 \$ CARBONO

007000 -0.022 \$ NITRÓGENO

008000 -0.751 \$ OXIGENO  
011000 -0.001 \$ SODIO  
015000 -0.001 \$ FOSFORO  
016000 -0.001 \$ AZUFRE  
017000 -0.002 \$ CLORO  
019000 -0.001 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*VEJIGA (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m9 001000 -0.105 \$ HIDROGENO  
006000 -0.096 \$ CARBONO  
007000 -0.026 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.761 \$ OXIGENO  
011000 -0.002 \$ SODIO  
015000 -0.002 \$ FOSFORO  
016000 -0.002 \$ AZUFRE  
017000 -0.003 \$ CLORO  
019000 -0.003 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*YODO 131(ICRP 89)\*\*\*\*\*

m10 053131 1 \$ NÚCLEO RADIATIVO DE I-131

C \*\*\*\*\*MEDULA ÓSEA ROJA (ICRU46)\*\*\*\*\*

m11 001000 -0.105 \$ HIDROGENO  
006000 -0.414 \$ CARBONO  
007000 -0.034 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.439 \$ OXIGENO  
015000 -0.001 \$ FOSFORO  
016000 -0.002 \$ AZUFRE

017000 -0.002 \$ CLORO  
019000 -0.002 \$ POTASIO  
026000 -0.001 \$ HIERRO

C \*\*ESQUELETO COLUMNA VERTEBRAL (D6,L3)(ICRU46)\*\*\*\*\*

m12 001000 -0.070 \$ HIDROGENO

006000 -0.287 \$ CARBONO  
007000 -0.038 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.437 \$ OXIGENO  
015000 -0.051 \$ FOSFORO  
016000 -0.002 \$ AZUFRE  
017000 -0.001 \$ CLORO  
012000 -0.001 \$ MAGNESIO  
019000 -0.001 \$ POTASIO  
020000 -0.111 \$ CALCIO  
026000 -0.001 \$ HIERRO

C \*\*CRISTALINO (Somayeh Asadi et all)\*\*\*\*\*

m13 001000 -0.096 \$ HIDROGENO

006000 -0.195 \$ CARBONO  
007000 -0.057 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.646 \$ OXIGENO  
011000 -0.001 \$ SODIO  
015000 -0.001 \$ FOSFORO  
016000 -0.003 \$ AZUFRE  
017000 -0.001 \$ CLORO

C \*\*\*\*\*OJO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m14 001000 -0.096 \$ HIDROGENO

006000 -0.195 \$ CARBONO

007000 -0.057 \$ NITRÓGENO

008000 -0.646 \$ OXIGENO

011000 -0.001 \$ SODIO

015000 -0.001 \$ FOSFORO

016000 -0.003 \$ AZUFRE

017000 -0.001 \$ CLORO

C \*\*\*\*\*CEREBRO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m15 001000 -0.107 \$ HIDROGENO

006000 -0.145 \$ CARBONO

007000 -0.022 \$ NITRÓGENO

008000 -0.712 \$ OXIGENO

011000 -0.002 \$ SODIO

015000 -0.004 \$ FOSFORO

016000 -0.002 \$ AZUFRE

017000 -0.003 \$ CLORO

019000 -0.003 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*VESÍCULA (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m16 001000 -0.105 \$ HIDROGENO

006000 -0.256 \$ CARBONO

007000 -0.027 \$ NITRÓGENO

008000 -0.602 \$ OXIGENO

011000 -0.001 \$ SODIO

015000 -0.002 \$ FOSFORO

016000 -0.003 \$ AZUFRE

017000 -0.002 \$ CLORO

019000 -0.002 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*CORAZÓN (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m17 001000 -0.104 \$ HIDROGENO

006000 -0.139 \$ CARBONO

007000 -0.029 \$ NITRÓGENO

008000 -0.718 \$ OXIGENO

011000 -0.001 \$ SODIO

015000 -0.002 \$ FOSFORO

016000 -0.002 \$ AZUFRE

017000 -0.002 \$ CLORO

019000 -0.003 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*ÚTERO (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m18 001000 -0.106 \$ HIDROGENO

006000 -0.315 \$ CARBONO

007000 -0.024 \$ NITRÓGENO

008000 -0.547 \$ OXIGENO

011000 -0.001 \$ SODIO

015000 -0.002 \$ FOSFORO

016000 -0.002 \$ AZUFRE

017000 -0.001 \$ CLORO

019000 -0.002 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*OVARIOS (ICRP 89)\*\*\*\*\*

m19 001000 -0.105 \$ HIDROGENO

006000 -0.093 \$ CARBONO  
007000 -0.024 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.768 \$ OXIGENO  
011000 -0.002 \$ SODIO  
015000 -0.002 \$ FOSFORO  
016000 -0.002 \$ AZUFRE  
017000 -0.002 \$ CLORO  
019000 -0.002 \$ POTASIO

C \*\*\*TEJIDO BLANDO (ICRU46,pag 11)\*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* (MONTSERAT MORALES CH.)\*\*\*\*\*

m20 001000 -0.106 \$ HIDROGENO

006000 -0.315 \$ CARBONO  
007000 -0.024 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.547 \$ OXIGENO  
011000 -0.001 \$ SODIO  
015000 -0.002 \$ FOSFORO  
016000 -0.002 \$ AZUFRE  
017000 -0.001 \$ CLORO  
019000 -0.002 \$ POTASIO

C \*\*\*\*\*AIRE\*\*\*\*\*

m21 006000 -0.000124 \$ CARBONO

007000 -0.755268 \$ NITRÓGENO  
008000 -0.231781 \$ OXIGENO  
018000 -0.012827 \$ ARGÓN

C \*\*\*\*\* FUENTE VOLUMÉTRICA DE I-131 \*\*\*\*\*

C \*\*\*\* ESPECTRO SACADO DE (ALBA MARTÍNEZ, 2015) \*\*\*\*

C \*\*\*\*\* POSICIÓN (0;-1.077; 72.5) \*\*\*\*\*

sdef pos=0 -1.077 72.5 cel=12 erg=d1 rad=d2 par=2

si1 L 0.80185 0.28431 0.325789 0.3645 0.503004 0.63699 0.722911

sp1 D 0.02607 0.06060 0.002670 0.8120 0.003590 0.07260 0.017960

si2 H 0 4

sp2 -21 2

C \*\*\*\*\* TALLY F6 (MeV/g) \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* SE INGRESARON LOS VALORES DE MASA (g) \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* (ICRP 128) \*\*\*\*\*

f6:p 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

sd6 183 149.5 149.5 20.9 94.3 418 500 500 1910 1100 258.6

f16:p 15 17 19 20 21 22 23 24 25

sd16 0.2 0.2 1420 66.2 762 770 79 4.355 4.355

C \*\*\*\*\* TALLY \*F8 (MeV) \*\*\*\*\*

\*f8:p 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

\*f18:p 15 17 19 20 21 22 23 24 25

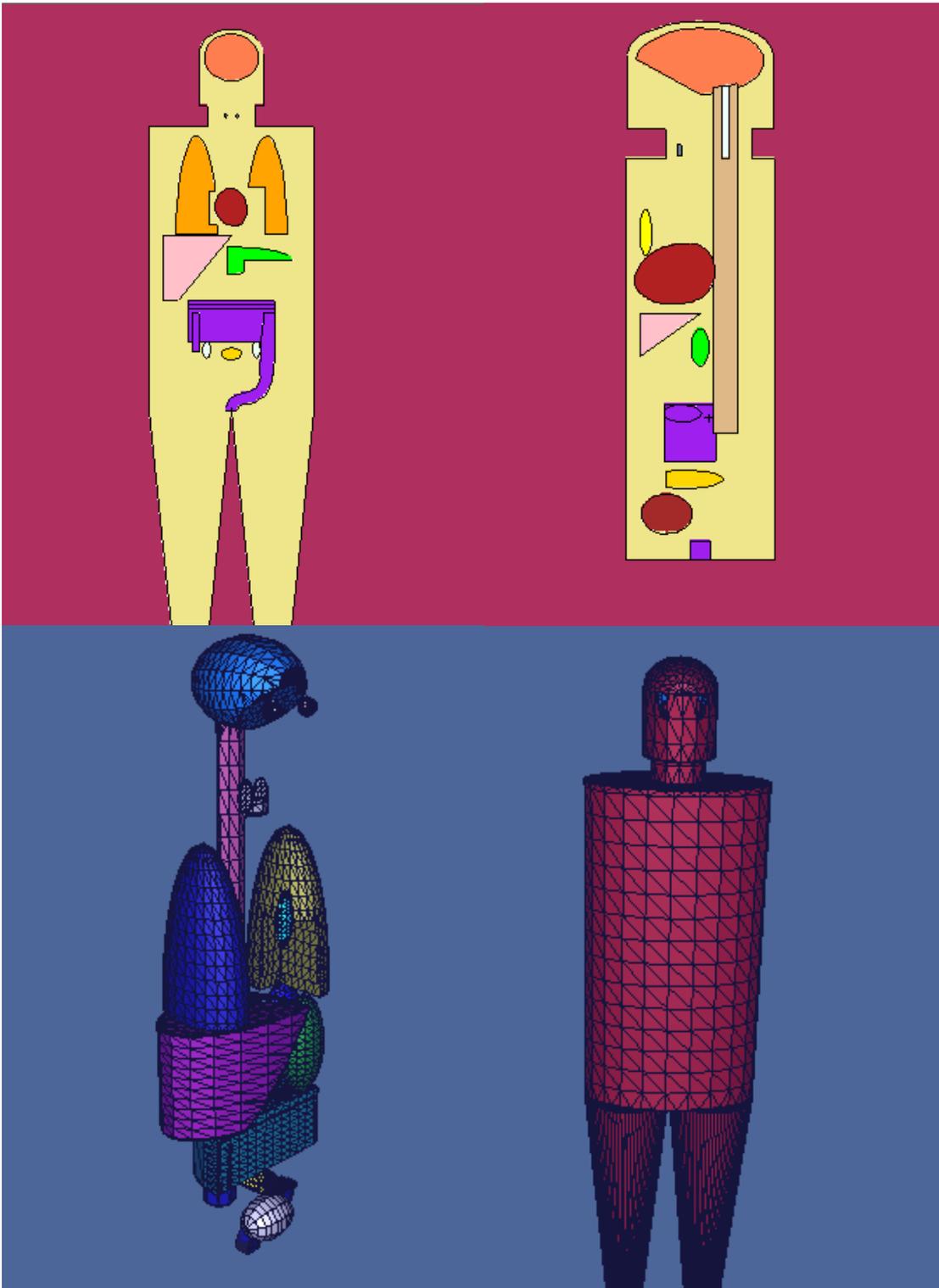
C \*\*\*\*\* TARJETA \*\*\*\*\*

prdmp 10000000 10000000 1000000000

print

nps 1000000000

**ANEXO 6. Vista del Fantoma MIRD en 2D y 3D.**



Nota: Esta imagen ha sido sacada del software MCNP5.

## ANEXO 7. Base de datos.

	Órgano	DAF6	DAF8	DAICR128	DAT	var
1	Bazo	1,81E+000	1,82E+000	7,50E+000	3,29E-001	
2	Cerebro	1,92E+001	1,93E+001	1,70E+001	1,27E+001	
3	Corazón	6,08E+000	6,09E+000	1,20E+001	1,21E+000	
4	Estomago	1,02E+000	1,02E+000	6,60E+001	2,69E-001	
5	Higado	1,77E+000	1,77E+000	1,40E+001	3,44E-001	
6	Intestino Delgado	2,05E-001	2,05E-001	3,20E+000	4,91E-002	
7	Intestino Grueso	1,84E-001	1,84E-001	4,20E+001	6,20E-002	
8	Ovario Derecho	9,38E-002	8,22E-002	1,75E+000	2,18E-002	
9	Ovario Izquierdo	1,00E-001	9,44E-002	1,75E+000	2,18E-002	
10	Páncreas	1,43E+000	1,44E+000	6,80E+000	4,37E-001	
11	Pulmón Derecho	1,20E+001	1,20E+001	7,50E+000	3,45E+000	
12	Pulmón Izquierdo	1,11E+001	1,11E+001	7,50E+000	3,45E+000	
13	Riñón Derecho	7,68E-001	7,61E-001	1,35E+001	1,98E-001	
14	Riñón Izquierdo	7,49E-001	7,45E-001	1,35E+001	1,98E-001	
15	Tímo	1,67E+001	1,66E+001	1,90E+001	9,43E+000	
16	Útero	7,98E-002	7,73E-002	3,80E+000	1,97E-002	
17	Vejiga	3,93E-002	3,96E-002	3,40E+001	9,63E-003	
18	Vesícula biliar	6,46E-001	6,42E-001	4,90E+000	1,71E-001	
19						

Nota: Esta imagen ha sido obtenida del SPSS.

---

**[Indique los nombres y apellidos completos del asesor o director]**

**ASESOR**

---

**[Indique los nombres y apellidos completos del presidente]**

**PRESIDENTE**

---

**[Indique los nombres y apellidos completos del secretario]**

**SECRETARIO**

---

**[Indique los nombres y apellidos completos del primer vocal]**

**VOCAL**

---

**[Indique los nombres y apellidos completos del segundo vocal]**

**VOCAL**

---

**[Indique los nombres y apellidos completos del tercer vocal]**

**VOCAL**