

Trabajo de grado

ADAPTACIÓN DE LA GUÍA “SAFETY REPORTS SERIES NO.63”[6] DEL ICPR
PARA EL EGRESO DE PACIENTES EN TRATAMIENTO CON I-131 EN LA
CLÍNICA IMBANACO SAS

Deivid Orlando Lopez Muñoz

Documento presentado a
Pregrado en Física
Como requisito para optar por el título de
Físico

Director: Mgtr.Johana Alexandra Velasco Jaramillo

Codirector: Dra.Ligia Edith Zamora Alfonso

Física
Facultad de ciencias exactas



Junio 2023

Resumen

La terapia con I-131 en pacientes con cáncer de tiroides es efectiva, pero presenta riesgos por la radiación, para las personas del entorno. Para cuantificar estos riesgos se usaron distintos detectores, a los cuales se les realizó una serie de pruebas para confirmar su correcto funcionamiento, y una vez garantizado, se midió la tasa de dosis emitida tanto a un metro de distancia (altura cuello) como a cinco centímetros de la glándula tiroidea, de 26 pacientes cuyas dosis de I-131 fueron de 3700MBq o 100 mCi y 5550MBq o 150 mCi. Se calculó la tasa de dosis anual para las personas que pudiesen estar en contacto con ellos durante este periodo, tales como la pareja, hijos y otros en el transporte público; con base a estos cálculos, se establecieron recomendaciones para limitar la tasa de dosis anual de las personas a 1 mSv/año. Estas recomendaciones variaron según la tasa de dosis emitida por el paciente en el momento del alta dosimétrica, siendo el límite máximo para el alta $70\mu Sv/h$. Para dichos pacientes que cumplan con el máximo establecido, se establecieron recomendaciones tales dormir a solas a partir del séptimo día, en cuanto al contacto diario con la pareja se establece en tres horas para el primer día, cinco para el segundo y 8 después del tercer día, por otro lado, evitar el contacto con niños (<2años) hasta nueve días después, para los infantes entre dos y cinco años se establecen ocho días y para aquellos que superen los once años llega a los seis días. En cuanto al transporte público, se establecen horas de transporte privado de dos horas y de 42 minutos para el caso de transporte público. De la misma manera, se realizan cálculos para tasas de dosis emitidas de $60\mu Sv/h$, $50\mu Sv/h$, $40\mu Sv/h$, $30\mu Sv/h$, $20\mu Sv/h$ y $10\mu Sv/h$. Adicionalmente, se identificaron casos especiales que podrían requerir un análisis adicional debido a la velocidad de eliminación del I-131 de cada paciente, lo que puede generar que los pacientes de más alta dosis (5550MBq o 150 mCi), puedan estar internados hasta 48 horas.

0.0.0.1 palabras clave

I-131, cáncer de tiroides, radiación, dosimetría, recomendaciones de radioprotección, terapia de yodo, riesgo por exposición, tasa de dosis anual

Abstract

I-131 therapy in patients with thyroid cancer is effective, but it poses radiation risks to people in the environment. To quantify these risks, various detectors were used, which underwent a series of tests to confirm their proper operation. Once this was guaranteed, the dose rate emitted both one meter away (neck height) and five centimeters from the thyroid gland was measured in 26 patients whose I-131 doses were 3700MBq or 100 mCi and 5550MBq or 150 mCi. The annual dose rate for people who might be in contact with them during this period, such as partners, children, and others in public transport, was calculated. Based on these calculations, recommendations were established to limit the annual dose rate of people to 1 mSv/year. These recommendations varied according to the dose rate emitted by the patient at the time of dosimetric discharge, with the maximum limit for discharge being $70\mu Sv/h$. For such patients who comply with the established maximum, recommendations were established such as sleeping alone from the seventh day, daily contact with the partner is established at three hours for the first day, five for the second and 8 after the third day, on the other hand, avoid contact with children (<2 years) until nine days later, for infants between two and five years eight days are established and for those who exceed eleven years it reaches six days. Regarding public transport, private transport hours of two hours and 42 minutes are established for the case of public transport. Similarly, calculations are made for emitted dose rates of $60\mu Sv/h$, $50\mu Sv/h$, $40\mu Sv/h$, $30\mu Sv/h$, $20\mu Sv/h$ and $10\mu Sv/h$. Additionally, special cases were identified that might require additional analysis due to the speed of elimination of I-131 from each patient, which can cause the highest dose patients (5550MBq or 150 mCi) to be hospitalized for up to 48 hours.

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que me brindaron su apoyo y colaboración en la realización de esta tesis. En primer lugar, a la Universidad del Valle por contar con un excelente profesorado que me brindó las herramientas y conocimientos necesarios para llevar a cabo esta investigación. También quiero agradecer a Ligia Edith, mi codirectora, por su incondicional apoyo y valioso conocimiento en todo momento, a Johana Alexandra Velasco Jaramillo, mi directora, por su vasta experiencia y sabiduría que adquirí durante mi estadía en la Clínica Imbanaco SAS y al Físico médico Erick Mora Ramirez, quien aportó su ayuda durante todo el desarrollo del trabajo de grado. Asimismo, deseo expresar mi gratitud a la Clínica Imbanaco SAS por sus instalaciones, equipos, apoyo económico y disposición para realizar la investigación. También quisiera reconocer a Luis Eduardo Lopez Latorre, un gran amigo que me ayudó a encontrar el camino y que estuvo siempre presente para brindarme su ayuda en todo lo que necesité. De igual manera, quiero agradecer al personal de la Clínica, en especial a Sebastián, Gerardo, Mario, Esmeralda, Grace, Mileidy, Alejandra, Mónica, Nini, Doranie y Claudia, por su disposición y paciencia en los procesos y por su apoyo en general. Agradezco también a los Médicos nucleares, el Dr. Cárdenas y el Dr. Muñoz, de quienes aprendí mucho sobre el proceso biológico de distintas enfermedades y padecimientos. A mi madre, Maria Del Rosario, por su grandísimo apoyo en todo el proceso durante mi carrera y su motivación constante que me impulsó a continuar. Por último, pero no menos importante, quisiera agradecer a mis amigos, Angélica, Damián, Nayeli, Esteban, Carlos, Tatiana, Nates, Andrea, Juliana y todos los demás, por todo su apoyo y por aquellos momentos que compartimos juntos. Cada uno de ellos fue especial en cada momento, y gracias a ellos soy la persona que soy hoy en día. También agradezco a todas las demás personas que me brindaron su apoyo, aunque no los haya mencionado aquí. Sin su ayuda, este trabajo no hubiera sido posible.

Tabla de contenido

	Pag.
Resumen	I
0.0.0.1 palabras clave	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Glosario	IV
TABLA DE CONTENIDO	V
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	VIII
1. Introducción.....	1
1.0.1 Actualidad clínica en Colombia.....	2
1.1 Problema de investigación.....	3
1.2 Objetivo General.....	3
1.3 Objetivos Específicos	3
2. Revisión	5
3. Marco teórico	7
3.1 Actividad	7
3.2 Dosimetría.....	10
3.2.1 Equilibrio electrónico	11
3.2.2 Equilibrio de partículas cargadas	13
3.3 Retención de fármacos y vida media biológica.....	14
3.4 Estimación de actividad retenida	20
3.5 Detección de la radiactividad	21
3.5.1 Incertidumbre, errores y desviaciones	23
3.5.2 Incertidumbre tipo A.....	24
3.5.3 Incertidumbre tipo B.....	25
3.6 Propagación de errores	26
3.7 Diagrama de decaimiento del I-131.....	27

4. Método experimental e instrumentos de medición	29
4.1 Toma de datos	29
4.1.1 Instrumentos de medición.....	29
4.1.2 Medición en pacientes	30
4.1.3 Metodología o protocolo de medición	31
4.2 Control de calidad de los detectores	32
4.3 Inspección física.....	32
4.3.1 Mediciones	32
5. Pruebas y resultados	34
5.1 Control de calidad de los detectores	34
5.1.1 Inspección física	34
5.1.2 Prueba de precisión.....	36
5.1.3 Prueba de exactitud	38
5.2 Análisis de datos de pacientes	40
6. Conclusiones	50
Bibliografía.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pag.
3.1 Volúmen esquemático captador de isótopos radiactivos.	12
3.2 Arreglo para la calibración de detectores de contaminación. (1) soporte para garantizar la distancia y geometría constante, (2) fuente estándar de referencia plana, (3) detector de contaminación.	22
3.3 Representación de la diferencia entre errores de medición e incertidumbres asociadas a las medidas[10].	24
3.4 Diagrama de decaimiento del I-131.	27
4.1 Curva de respuesta energética del detector $\alpha - \gamma - \beta$ modelo 44-7 de la marca Ludlum.	30
4.2 Forma geométricamente adecuada de realizar la medición de una fuente con geometría vial, con un detector de geometría plana.	33
5.1 Verificación de funcionamiento del equipo Graetz CoMo-170.	35
5.2 Verificación de funcionamiento del equipo Ludlum Model 3001.	35
5.3 Verificación de funcionamiento del equipo Ludlum Model C14.	36
5.4 Verificación de baterías de todos los detectores usados.	36
5.5 Verificación de la precisión de los detectores Model 3001(a), Model C14(a) y CoMo170(b).	37
5.6 Caracterización demográfica de los pacientes bajo estudio.	40
5.7 Caracterización de la actividad retenida por paciente a un metro.	41
5.8 Caracterización de la actividad retenida por paciente a cinco centímetros de la tiroides.	42

ÍNDICE DE CUADROS

TABLA		Pag.
2.1	[6]Recomendaciones para los pacientes con cáncer de tiroides que reciben tratamiento de yodo radiactivo para restringir la dosis de familiares y colaboradores a 1mSv	5
2.2	Actividad y tasa de dosis para autorizar el alta dosimétrica del paciente en terapia de I-131[6]	6
3.1	[1]Biocinética involucrada en tiroides, riñones, contenido de la vejiga, SI, estómago y el resto de órganos para captación del 0 %, 5 %, 15 % y 25 % .	16
3.2	[1]Biocinética involucrada en tiroides, riñones, contenido de la vejiga, SI, estómago y el resto de órganos para captación del 35 %, 45 % y 55 %	17
3.3	[1]Dosis absorbida por órgano, dependiendo de la actividad administrada y la retención del yodo en la tiroides(0 %-25 %)	18
3.4	[1]Dosis absorbida por órgano, dependiendo de la actividad administrada y la retención del yodo en la tiroides(35 %-55 %)	19
5.1	Recomendaciones para los pacientes bajo tratamiento de I-131 para cáncer de tiroides, egresados de la Clinica Imbanaco SAS. Con respecto a la pareja o acompañante.....	47
5.2	Recomendaciones para los pacientes bajo tratamiento de I-131 para cáncer de tiroides, egresados de la Clinica Imbanaco SAS. Con respecto al entorno infantil.	47
5.3	Recomendaciones para los pacientes bajo tratamiento de I-131 para cáncer de tiroides, egresados de la Clinica Imbanaco SAS. Las recomendaciones de transporte deberán ser acatadas durante los primeros 4 días desde el alta dosimétrica.....	48
5.4	Desviaciones estándar de los cálculos realizados en las tablas de recomendaciones 5.1 5.2 5.3.	48

1. Introducción

La utilización de la radiación en el ámbito médico se remonta a 1895[3], cuando se comenzaron a utilizar los rayos X para obtener imágenes de los huesos. Por otro lado, la medicina nuclear comenzó a desarrollarse alrededor de 1935 y la terapia con yodo radiactivo tuvo sus inicios en 1941. Gracias a los avances tecnológicos y al fácil acceso a los insumos y fármacos necesarios para las imágenes, tratamientos y diagnósticos, el uso de la radiación en la medicina ha transformado este campo de manera significativa.

La medicina nuclear se inició con tratamientos para el hipertiroidismo, lo que generó diversas problemáticas en cuanto a la seguridad del paciente, la dosimetría, la biodistribución de los fármacos y la seguridad de sus familiares cercanos. Esto se debe a que el paciente se convierte en una fuente de radiación que no puede ser aislada como una fuente inerte. Para abordar estas cuestiones, se han llevado a cabo numerosos estudios. En primer lugar, se ha evaluado la dosis interna del paciente[12] y la biodistribución del fármaco en casos especiales como el carcinoma hepatocelular[5] o pacientes con afectaciones renales[11]. También se han analizado las variaciones respecto al paciente estándar para obtener un mejor tratamiento y mejores recomendaciones. Además, se cuenta con un amplio catálogo de guías internacionales, como las recomendaciones del ICPR, que se utilizan como referencia para este trabajo.

En particular, se adaptan las recomendaciones de esta guía[6] para la seguridad del paciente en el hogar y de sus familiares cercanos después del tratamiento con yodo radiactivo en el contexto colombiano de los pacientes atendidos en la Clínica Imbanaco S.A.S. Estas recomendaciones se basan principalmente en el tiempo transcurrido con el paciente, en función de la distancia promedio esperada. Por ejemplo, si el paciente comparte la cama con un acompañante durante la noche, se estima que pasará junto a él al menos 8 horas a una distancia promedio de 5 cm. Con estas estimaciones, se calcula la dosis equivalente recibida por el acompañante en diferentes momentos del tratamiento, asegurándose de que se encuentre dentro de los límites legales y sea segura para él.

En muchos estudios se realiza un seguimiento de pacientes con condiciones

especiales, como por ejemplo aquellos con metástasis ósea derivada del cáncer de tiroides, ya que presentan grandes lesiones. Se ha observado que estos pacientes retienen una mayor cantidad de actividad radiactiva debido a que gran parte del tejido maligno conserva características del tejido tiroideo original. Por esta razón, estos pacientes pueden requerir un período de hospitalización más largo o recomendaciones especiales y extendidas.

Los pacientes que reciben este tratamiento deben seguir una serie de recomendaciones y precauciones para evitar la exposición innecesaria a la radiación[2]. Es importante que los médicos que prescriben este tratamiento estén debidamente capacitados y actualizados en las recomendaciones de seguridad y cuidados para garantizar la seguridad del paciente y su entorno cercano. Los pacientes también deben ser educados y concientizados sobre la importancia de seguir estas recomendaciones, como el consumo adecuado de líquidos y las precauciones para evitar las tasas de dosis altas a otras personas de su entorno. La educación y concientización son herramientas clave para garantizar la seguridad y efectividad del tratamiento con yodo 131 en pacientes con cáncer de tiroides.

En el ámbito de la medicina nuclear, es crucial entender conceptos fundamentales como la radioactividad, los detectores de estado sólido, los dosímetros y la tasa de dosis. La radioactividad, el proceso por el cual los núcleos atómicos inestables liberan energía, es la base de los tratamientos de medicina nuclear como la terapia con I-131. Los detectores de estado sólido y los dosímetros son instrumentos esenciales para medir el decaimiento radiactivo y la dosis absorbida de radiación, respectivamente. La tasa de dosis, o la cantidad de radiación absorbida por unidad de tiempo, es un parámetro clave para determinar la duración de la hospitalización de un paciente después del tratamiento. Con estos conceptos fundamentales en mente, podemos proceder a discutir la situación actual de la medicina nuclear en Colombia y cómo se están manejando estos aspectos en la Clínica Imbanaco SAS.

1.0.1 Actualidad clínica en Colombia

Actualmente en la clínica Imbanaco SAS, se tiene unas recomendaciones a nivel general para todos los pacientes, las cuales están estandarizadas y basadas en la guía

internacional del ICRP [6], estas recomendaciones son los estándares con los que debe contar cada clínica en el país, sin embargo, dada la carencia de investigación a nivel nacional en este tema, puede que estas recomendaciones no tengan un alcance óptimo.

En la clínica Imbanaco SAS, las recomendaciones generales se extraen directamente de estudios previos en otras regiones[2]. El protocolo de egreso ya cuenta con una medición post-terapia, la cual permite garantizar que el paciente sea dado de alta con un máximo de $70\mu Sv/h$. Las recomendaciones que el paciente recibe se ofrecen en un folleto estándar al paciente y poco personalizadas. Por otro lado, se le aclaran las dudas de forma verbal.

Este estudio pretende personalizar las recomendaciones para cada paciente según la tasa de dosis emitida en el momento del alta, esto permite que la calidad de vida de cada paciente sea mejorada en su post-tratamiento, así mismo, caracterizar la población atendida en la Clínica Imbanaco SAS, permitiendo detectar anomalías en los tratamientos con I-131.

1.1 Problema de investigación

¿Las recomendaciones de egreso del paciente típico de terapia con I-131 para el cáncer de tiroides se ajustan a las necesidades del paciente, seguridad de sus cuidadores y/o familiares?

1.2 Objetivo General

- Implementar desde un punto de vista clínico, el egreso de pacientes después de una terapia con I-131 según el reporte "Safety Reports Series No.63" del ICRP[6], en la Clínica Imbanaco Grupo Quirón Salud.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar controles de calidad a los detectores de radiación portátil empleado en el alta dosimétrica del paciente.

- Estimar la actividad retenida del paciente de terapia con I-131 para el tratamiento de cáncer de tiroides o hipertiroidismo, según la actividad administrada.
- Realizar el protocolo de egreso específico por paciente respecto a la actividad retenida y estandarizar las instrucciones necesarias al paciente después de una terapia con I-131.

2. Revisión

Este trabajo se enfoca en ampliar las recomendaciones del ICRP, específicamente en su guía "Safety report No.63"[6], para pacientes con cáncer de tiroides que reciben tratamiento de yodo radiactivo. Estas recomendaciones se basan en el cálculo de dosis bajo diferentes circunstancias, incluyendo la distancia y el tiempo que el paciente pasa cerca de sus familiares y colaboradores.

Actividad administrada (Mbq)	Tiempo fuera del trabajo (d)	Tiempo para dormir a solas y restringir el contacto con la pareja (d)	Tiempo para restringir el contacto con niños <2 años de edad (d) ^a	Tiempo para restringir el contacto con niños 2-5 años de edad (d)	Tiempo para restringir el contacto con niños 5-11 años de edad (d)
1850	1, 3 ^b	3, 16 ^b	4, 16 ^b	3, 13 ^b	2, 10 ^b
3700	2,7	4,20	4,20	4,17	3,13
5550	2,10	4,22	5,22	4,19	3,16
7400	2,12	5,23	5,24	4,21	4,17

^a Asumiendo que se duerme a 1m de distancia durante 8 horas

^b El primer valor es para pacientes de seguimiento de dosis, el segundo corresponde a pacientes de ablación tiroidea(valores después de la coma).

Cuadro 2.1: [6]Recomendaciones para los pacientes con cáncer de tiroides que reciben tratamiento de yodo radiactivo para restringir la dosis de familiares y colaboradores a 1mSv

Es importante destacar que estas recomendaciones aplican para una actividad mínima de 1850 MBq o 50 mCi de yodo radiactivo retenido. Además, se incluye una tabla que muestra la equivalencia entre la actividad retenida y la dosis a 1 metro de distancia, lo que permite inferir la actividad retenida que presentan los pacientes en la salida.

Radionúclido	Actividad (MBq)	Tasa de dosis a 1m (mSv/h)	Actividad para una tasa al publico de 5 mSv	Actividad para una tasa al publico de 1 mSv
I-131	1200	0,07	1200	240

Cuadro 2.2: Actividad y tasa de dosis para autorizar el alta dosimétrica del paciente en terapia de I-131[6]

Como se puede observar en la guía internacional, la actividad retenida recomendada para dar el alta dosimétrica y exponer al público a un máximo de 5 mSv es de 1200 MBq o 32,4 mCi. Mientras tanto en Colombia se tiene la ley [13], la cual exige que para tratamientos que superen los 30 mCi de material radiactivo, se debe internar al paciente. La Clínica imbanaco SAS posee el límite establecido como en la guía internacional ($70\mu Sv/h$). Cabe resaltar que la equivalencia es aproximada debido a que la dispersión de la radiación debido al cuerpo humano puede resultar en una tasa de dosis menor o mayor, este fenómeno se ve reflejado en las futuras mediciones con los intensímetros.

3. Marco teórico

La dosimetría se basa en el conocimiento de la actividad radiactiva y su impacto en la protección radiológica del público en general. Para calcular la dosimetría, es necesario entender la definición de actividad y considerar el tipo de radiación a la que se expone el paciente, así como la distribución del radiofármaco en el cuerpo y sus residuos. También es importante tener en cuenta los comportamientos sociales y físicos del paciente con visitantes, familiares y cuidadores. Todos estos factores se deben considerar para poder calcular de manera precisa la dosimetría.

Una vez que se han considerado todas estas variables, es importante tener en cuenta el tipo de detectores que se están utilizando, así como su calibración y su comportamiento frente a las diferentes energías de las partículas de radiación a las que se está expuesto. Para ello, se lleva a cabo una revisión bibliográfica breve que cubre la calibración y las consideraciones geométricas del sistema de medición, de manera que se pueda obtener una medida precisa de la actividad radiactiva y se evite la sobreestimación o subestimación de la misma.

3.1 Actividad

la unidad de medida de la actividad es el Becquerel (Bq), que corresponde a una desintegración por segundo[4]. Por lo tanto, la actividad radiactiva de un radiofármaco se puede medir directamente utilizando un detector adecuado, como un contador de Geiger o un detector de centelleo. Tal que,

$$A(t) = -\frac{dA}{dt} \quad (3.1)$$

para lo cual da una solución del siguiente tipo

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

Para lo cual, A_0 es la actividad inicial del isótopo radiactivo y λ se define como

$\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$. Donde $T_{1/2}$ es el tiempo de vida media del isótopo radiactivo, el cual es el tiempo que el isótopo tarda en llegar a la mitad de la actividad radiactiva inicial.

Por otro lado, existe el tiempo de vida media biológico[1] que actúa de forma similar al expuesto anteriormente. Sin embargo, se deben tener en cuenta las distintas distribuciones de concentración en los distintos órganos, que varían según el nivel de captación del fármaco en la glándula tiroidea. Los valores de la vida media se encuentran consignados en la literatura[1].

La ecuación que describe el comportamiento de la actividad completa del paciente es la siguiente

$$A(t) = \sum_{i=1}^n k_i e^{(\lambda_i + \lambda_p)t} \quad (3.3)$$

Donde las constantes k_i dependen de la retención de la actividad del órgano y el coeficiente λ_i es el coeficiente decaimiento biológico asociado al metabolismo del mismo. Por último, el término λ_p es el decaimiento típico del isótopo radiactivo. Este modelo nos proporciona una aproximación teórica muy útil, sin embargo, es necesario definir la siguiente[1]

$$\frac{A_S(t)}{A_0} = F_s \sum_{j=n+1}^{n+m} a_j \sum_{i=1}^n \left\{ a_i \frac{T_i}{T_i - T_j} \left[\exp\left(\frac{-\ln(2)}{T_{i,eff}}t\right) - \exp\left(\frac{-\ln(2)}{T_{j,eff}}t\right) \right] \right\} \quad (3.4)$$

Para ello se define F_s como la fracción distribuida en el órgano o tejido S, mientras que a_i representa la fracción de actividad eliminada de F_s en un tiempo de vida media de T_i (donde $\sum a_i = 1$). Además, a_j se refiere a la actividad retenida en el órgano o tejido F_s con un tiempo de vida media de T_j . El valor de n corresponde al número de componentes radiactivos eliminados y m al número de componentes radiactivos retenidos. Por último, $T_{i,eff}$ y $T_{j,eff}$ se definen como la vida media efectiva de los componentes eliminados y retenidos, respectivamente.

Con todo lo anterior, y sabiendo que

$$\frac{1}{T_{i,eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_i} \quad (3.5)$$

La ecuación (3.4) se puede simplificar si partimos de la captación máxima del fármaco. En este caso, la ecuación queda tal que

$$\frac{A_S(t)}{A_0} = F_S \sum_{i=1}^n a_i \exp\left(\frac{-\ln(2)}{T_{i,eff}} t\right) \quad (3.6)$$

Integrando sobre el tiempo se obtiene la expresión de actividad normada tal que [1]

$$\frac{\tilde{A}_s}{A_0} = F_s \sum_{i=1}^n a_i \frac{T_{i,eff}}{\ln(2)} \quad (3.7)$$

De la cual se puede obtener la siguiente ecuación:

$$F_A = \exp\left(-\frac{t \ln 2}{T_f} - \frac{t \ln 2}{T_b}\right) \quad (3.8)$$

T_f es el tiempo de vida media físico del I-131 establecido en 192,96 horas, mientras que el T_b es tiempo de vida media biológico del fármaco en el paciente. t es el tiempo transcurrido entre la administración de la dosis y el actual. F_A es fracción de actividad retenida en el tiempo t .

Por otro lado, se puede hacer énfasis en cada paciente y obtener su vida media específica usando una aproximación experimental[8][7] tal que

$$F_A = e^{-T_e t} \quad (3.9)$$

En el que T_e es un factor de decaimiento similar al factor λ de decaimiento pero es obtenido y optimizado de cada paciente específico.

Respecto al método de optimización para la obtención de los parámetros, se usa la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial T_{b1,2}} \sum_{n=0}^{n=22/n=4} (S(h) - F_A(h))^2 = 0 \quad (3.10)$$

Donde $S(h)$ es la medición de cada paciente, h es la hora a la que corresponde la medida S , $T_{b_{1,2}}$ corresponde al tiempo de vida biológico de la actividad retenida de los pacientes para aquellos que tienen un tratamiento con 3700MBq (100 mCi) y 5550MBq (150 mCi) respectivamente. Para resolver esta ecuación se implementa mediante herramientas como Excel o Python, se debe hacer la diferencia cuadrática entre el dato teórico y el experimental, seguidamente, se optimiza la suma cuadrática y se obtiene los parámetros teóricos de dicha optimización(T_b).

3.2 Dosimetría

La necesidad de cuantificar el daño que causa la radiación a un tejido nos lleva a generar distintas cantidades. Las principales son el Gray, el Sievert y el Rem. Su definición parte del siguiente principio[9]:

$$\bar{\varepsilon} = R_{\text{in}} - R_{\text{out}} + \sum Q \quad (3.11)$$

Para ello, se considera que la energía media depositada en un volumen de tejido es ε , y las cantidades que lo definen son las siguientes: R_{in} , que define la radiancia media incidente; R_{out} , que es la radiancia media que sale del volumen; y $\sum Q$, que define la diferencia media de cargas tras el paso de la radiación (por ejemplo, si la cantidad de Q es mayor que cero, entonces el total de energía media disminuye en comparación con el tejido inicial; si Q es menor que cero, la energía media aumenta en comparación con el tejido inicial).

Dado lo anterior, podemos establecer la siguiente definición, la cual describe la tasa de dosis absorbida:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad (3.12)$$

En el cual $d\bar{\varepsilon}$ es la energía media depositada sobre la masa dm , para lo cual se define la unidad el Grey Gy con unidades de Jkg^{-1} .

Por otro lado, la dosis absorbida equivalente se define como

$$H = QD \quad (3.13)$$

En el cual H es la tasa de dosis equivalente en Sievert y Q es el factor de calidad, asociado con el tipo de radiación medida. De forma análoga se define la dosis absorbida para dosimetría en órgano

$$H_T = \sum_R W_T D_{T,R} \quad (3.14)$$

En el que W_T es el factor Q de ponderación por órgano, dicho factor puede variar por la sensibilidad del tejido a la radiación.

Para las recomendaciones, se realizó el cálculo de las tasas de dosis del paciente a 1 metro y a 5cm de la glándula tiroides(zona de mayor captación[1]).

$$D_t = D_0 \exp \left(-\frac{t \ln 2}{T_f} - \frac{t \ln 2}{T_b} \right) \quad (3.15)$$

Para la cual se debe obtener la vida media biológica (T_b) y la tasa de dosis inicial (D_0) que el paciente promedio emite.

3.2.1 Equilibrio electrónico

Los tratamientos en medicina nuclear implican la administración de altas actividades y la recepción de altas tasas de dosis por parte de los pacientes. Sin embargo, es necesario respaldar con bases sólidas el riesgo que esto representa, lo que nos permitirá modelar, cuantificar y prevenir posibles efectos. Para lograrlo, se utilizan distintos métodos para calcular teóricamente la radiación emitida por un tejido que retiene el isótopo. Uno de ellos es el siguiente:

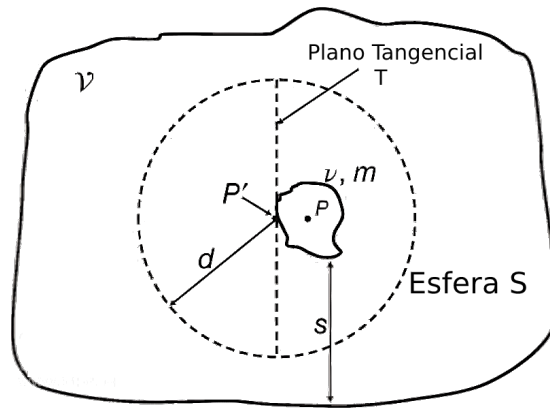


Figura 3.1: Volúmen esquemático captador de isótopos radiactivos.

[9]Fig3.1: Considere un volumen V generalizado, con un volumen de interés v , en el cual pasan las partículas emitidas por el punto P' . d es la distancia máxima de penetración de todas las partículas.

Las condiciones que se debe tener en cuenta las consideraciones del volumen V , son las siguientes:

- La composición atómica del volumen debe ser homogénea.
- La densidad homogénea.
- La actividad radiactiva debe estar uniformemente distribuida.
- No deben existir campos electromagnéticos externos capaces de perturbar las partículas que posean carga.

Por otro lado, los neutrinos se excluyen del cálculo porque se requiere una distancia que suele superar con creces la que se encuentra típicamente en el cuerpo humano para que interactúen con la materia. Esta aproximación puede empeorar en el caso de interacciones con partículas β , ya que las aniquilaciones con los electrones de los átomos pueden generar neutrinos. En el caso de las partículas γ y los neutrones, se sabe que se atenúan de forma exponencial, por lo que la distancia d debe ser suficiente para contener la mayoría de las emisiones radiactivas.

Siguiendo las condiciones y consideraciones anteriores, si tomamos un plano tangencial al volumen v en el punto P' y consideramos el límite no estocástico (es decir, que la radiación incidente es suficiente para causar efectos deterministas), entonces existe una simetría de las partículas que atraviesan a ambos lados. Es decir, el mismo número de partículas por unidad de área pasan hacia un lado como hacia el lado contrario del plano. A esto se le conoce como equilibrio electrónico (RE) con respecto al volumen v .

Con estas consideraciones, podemos escribir la ecuación de la energía impartida como:

$$\bar{\varepsilon} = (\bar{R}_{\text{in}})_{\text{u}} - (\bar{R}_{\text{out}})_{\text{u}} + (\bar{R}_{\text{in}})_{\text{c}} - (\bar{R}_{\text{out}})_{\text{c}} + \sum \bar{Q} \quad (3.16)$$

En donde u y c denotan las partículas no cargadas y cargadas, respectivamente. Dadas las condiciones de equilibrio electrónico, se tiene que $(\bar{R}_{\text{in}})_{\text{u}} = (\bar{R}_{\text{out}})_{\text{u}}$ y $(\bar{R}_{\text{in}})_{\text{c}} = (\bar{R}_{\text{out}})_{\text{c}}$ [9]

Por lo que la ecuación 3.16 queda tal que

$$\bar{\varepsilon} = \sum \bar{Q} \quad (3.17)$$

Por lo que, bajo las condiciones del equilibrio electrónico, se tiene que el valor esperado de la energía media impartida en el volumen v es exactamente igual a la emitida por este.

Tomando el límite diferencial

$$D = d\bar{\varepsilon}/dm \quad (3.18)$$

tal que la ecuación 3.17 toma la forma de tasa de dosis para el límite no estocástico.

3.2.2 Equilibrio de partículas cargadas

Similar al tema anterior, el equilibrio de partículas se refiere a cuando el número de partículas cargadas cumple la igualdad $(\bar{R}_{\text{in}})_{\text{c}} = (\bar{R}_{\text{out}})_{\text{c}}$. Cabe resaltar que siempre que

existe el equilibrio electrónico, existe el equilibrio de partículas cargadas, sin embargo, esto no ocurre al contrario[9]. La ecuación (3.12) queda tal que

$$\bar{\varepsilon} = (\bar{R}_{\text{in}})_{\text{u}} - (\bar{R}_{\text{out}})_{\text{u}} + \sum \bar{Q} \quad (3.19)$$

Se presuponen las 4 condiciones anteriores del volumen V . Para el término $(\bar{R}_{\text{in}})_{\text{u}}$, se sabe que debido a la geometría y a que consideramos un volumen con radiactividad uniforme, sin fuentes externas de radiación; por lo que este vale cero. Para el segundo término $(\bar{R}_{\text{out}})_{\text{u}}$ se sabe que una parte sale del volumen sin interacciones, pues estas partículas no poseen carga. Con las consideraciones anteriores, la expresión 3.15 queda tal que

$$\bar{\varepsilon} = \sum \bar{Q} - (\bar{R}_{\text{out}})_{\text{u}} \quad (3.20)$$

Y debido a que este término se debe a las partículas no cargadas que no se detienen dentro del volumen con radio d en la figura 3.1, siempre se puede considerar un volumen lo suficientemente grande como para que estas partículas interactúen, generando que la ec. 3.20 se convierta en la ec. 3.17. Por lo que en el marco de equilibrio de partículas cargadas, es posible obtener el mismo resultado que equilibrio electrónico, siempre que se tome un volumen lo suficientemente grande.

3.3 Retención de fármacos y vida media biológica

En medicina nuclear, se administran distintos fármacos o elementos químicos a los pacientes para su terapia o estudio. Para que estos cumplan su función, es necesario que se distribuyan de cierta manera dentro del organismo y se observa una retención que difiere de órgano en órgano.

El estudio de estos parámetros es fundamental en el área de medicina nuclear, ya que gracias a esto se puede estimar la dosis absorbida por órgano y, así, ofrecer un tratamiento óptimo y con la menor exposición posible.

Los modelos de la biocinética involucrada en la distribución del yodo abarcan el

movimiento e intercambio de fluidos. Sin embargo, para nuestros propósitos de dosimetría, no es relevante. Por lo tanto, se opta por tener en cuenta solamente la retención en cada órgano. Dentro de estas consideraciones, la retención fraccionada por órgano se encuentra con parámetros que varían entre 0,05 y 0,25 dependiendo del órgano[1].

Tomemos en cuenta únicamente la captación por órgano del estómago, intestino y tiroides. Para parametrizar, se toma la captación tiroidea de entre un 0,05 hasta un 0,55; con seis distintos niveles. Por otro lado, la vida media biológica del yodo en el cuerpo entero varía entre 6 y 8 horas. Para propósitos de generalidad, se toma el máximo de 8 horas, que coincide con el tiempo de limpieza renal. Para la tiroides en adultos, este valor es de 80 días. Por último, para el resto de órganos, se considera un tiempo de vida media de 8 horas, que coincide con el tiempo de limpieza renal mencionado anteriormente[1].

Se deben tener en cuenta las limitaciones del modelo asumido, ya que no tiene en cuenta el yodo que ya se encuentra en el cuerpo ni su catabolismo. Además de estas limitaciones y diferencias, se debe tener en cuenta que el modelo toma en cuenta una dosis administrada de manera intravenosa. A pesar de las diferencias que se presentan en la dosimetría del estómago, pues se estima que durante el tiempo de absorción de dosis, la mayor parte de la dosis absorbida será en el estómago, aumentando la dosis absorbida por al menos un 30%. Se tiene en cuenta un período de absorción de 0,5 horas. Lo cual no afecta los propósitos de este estudio.

Biocinética del Yodo (1)				
Órgano (S)	F_s	T	a	$\frac{\tilde{A}_s/A_0}{^{131}I}$
(1) Tiroides bloqueada, retención del 0 %	1,0	8 h	1,0	11,1 h
Riñones.	1,0			7,7 min
Contenido de la vejiga	1,0			1,76 h
(2) Retención de la tiroides del 5 %	0,05	8 h	-1,0	
Adulto		80 d	1,0	12,1 h
Estómago	0,15	8 h	1,0	1,66 h
SI	0,15	8 h	1,0	1,66 h
Riñones	1,0			6,6 min
Contenido de la vejiga	1,0			1,67 h
Resto de órganos	0,7	8 h	1,0	7,76 h
(3) Retención de la tiroides del 15 %	0,05	8 h	-1,0	
Adulto		80 d	1,0	1,52 d
Estómago	0,15	8 h	1,0	1,66 h
SI	0,15	8 h	1,0	1,66 h
Riñones	1,0			6,1 min
Contenido de la vejiga	1,0			1,5 h
Resto de órganos	0,7	8 h	1,0	7,76 h
(4) Retención de la tiroides del 25 %	0,05	8 h	-1,0	
Adulto		80 d	1,0	2,53 d
Estómago	0,15	8 h	1,0	1,66 h
SI	0,15	8 h	1,0	1,66 h
Riñones	1,0			5,7 min
Contenido de la vejiga	1,0			1,32 h
Resto de órganos	0,7	8 h	1,0	7,76 h

Cuadro 3.1: [1]Biocinética involucrada en tiroides, riñones, contenido de la vejiga, SI, estómago y el resto de órganos para captación del 0 %, 5 %, 15 % y 25 %

Biocinética del Yodo (2)

Organo (S)	F_s	T	a	$\frac{\tilde{A}_s/A_0}{^{131}I}$
(5) Retención de la tiroides del 35 %	0,05	8 h	-1,0	
Adulto		80 d	1,0	3,54 d
Estómago	0,15	8 h	1,0	1,66 h
SI	0,15	8 h	1,0	1,66 h
Riñones	1,0			5,2 min
Contenido de la vejiga	1,0			1,14h
Resto de órganos	0,7	8 h	1,0	7,76 h
(6) Retención de la tiroides del 45 %	0,05	8 h	-1,0	
Adulto		80 d	1,0	5,57 d
Estómago	0,15	8 h	1,0	1,66 h
SI	0,15	8 h	1,0	1,66 h
Riñones	1,0			4,2 min
Contenido de la vejiga	1,0			58 min
Resto de órganos	0,7	8 h	1,0	7,76 h
(7) Retención de la tiroides del 55 %	0,05	8 h	-1,0	
Adulto		80 d	1,0	5,57 d
Estómago	0,15	8 h	1,0	1,66 h
SI	0,15	8 h	1,0	1,66 h
Riñones	1,0			4,2 min
Contenido de la vejiga	1,0			48 min
Resto de órganos	0,7	8 h	1,0	7,76 h

Cuadro 3.2: [1]Biocinética involucrada en tiroides, riñones, contenido de la vejiga, SI, estómago y el resto de órganos para captación del 35 %, 45 % y 55 %

Por lo que, teniendo en cuenta las distintas duraciones del yodo en el organismo($\tilde{A}_s/A_0$) dadas en la tabla 3.1 y en la tabla 3.2, se puede estimar, dada las ecuaciones 3.4 y 3.14, la dosimetría por órgano, obteniéndose las siguientes tablas de datos

I-131(1)				
I-131	8,04 d			
Organo	Dosis absorbida			
	por unidad de actividad administrada(mGy/MBq)			
Nivel de captación tiroidea	0 %	5 %	15 %	25 %
Glándulas suprarrenales	$3,7 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-2}$
Pared de la vejiga	$6,1 \times 10^{-1}$	$5,8 \times 10^{-1}$	$5,2 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$
Superficie osea	$3,2 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-2}$	$6,1 \times 10^{-2}$
Mama	$3,3 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$	$5,5 \times 10^{-2}$
Tracto gastrointestinal				
Pared del estómago	$3,4 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$
Intestino delgado	$3,8 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-1}$	$2,8 \times 10^{-1}$	$2,8 \times 10^{-1}$
Pared superior del intestino grueso	$3,7 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-2}$
Pared inferior del intestino grueso	$4,3 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$
Riñones	$6,5 \times 10^{-2}$	$6,3 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-2}$
Hígado	$3,3 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$
Pulmones	$3,1 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^{-2}$
Ovarios	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$
Páncreas	$3,5 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-2}$
Médula roja	$3,5 \times 10^{-2}$	$3,8 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{-2}$
Bazo	$3,4 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-2}$
Testículos	$3,7 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$
Tiroides	$2,9 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^1$	$2,1 \times 10^2$	$3,6 \times 10^2$
Útero	$5,4 \times 10^{-2}$	$5,5 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$
Otros tejidos	$3,2 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-2}$	$9,0 \times 10^{-2}$
Dosis efectiva equivalente (mSv/MBq)	$7,2 \times 10^{-2}$	2,3	6,6	$1,1 \times 10^1$

Cuadro 3.3: [1]Dosis absorbida por órgano, dependiendo de la actividad administrada y la retención del yodo en la tiroides(0 %-25 %)

Las dosis administradas varían entre valores de 100 mCi y 150 mCi o de 3700 MBq a 5550 MBq, por lo que las dosis absorbidas equivalentes de un paciente, van desde 266 mSv hasta 88,8 Sv, dependiendo de la captación tiroidea del yodo.

I-131 (2)			
I-131	8,04 d		
Organo	Dosis absorbida		
	por unidad de actividad administrada(mGy/MBq)		
Nivel de captación tiroidea	35 %	45 %	55 %
Glándulas suprarrenales	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-2}$	$4,9 \times 10^{-2}$
Pared de la vejiga	$4,0 \times 10^{-1}$	$3,4 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-1}$
Superficie osea	$7,6 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$
Mama	$6,7 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-2}$
Tracto gastrointestinal			
Pared del estómago	$4,6 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$
Intestino delgado	$2,8 \times 10^{-1}$	$2,8 \times 10^{-1}$	$2,8 \times 10^{-1}$
Pared superior del intestino grueso	$5,8 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-2}$
Pared inferior del intestino grueso	$4,0 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-2}$
Riñones	$5,6 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-2}$	$5,1 \times 10^{-2}$
Hígado	$3,7 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$
Pulmones	$9,0 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-1}$
Ovarios	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$
Páncreas	$5,4 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-2}$
Médula roja	$8,6 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$
Bazo	$4,6 \times 10^{-2}$	$4,9 \times 10^{-2}$	$5,1 \times 10^{-2}$
Testículos	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$
Tiroides	$5,0 \times 10^2$	$6,4 \times 10^2$	$7,9 \times 10^2$
Útero	$5,0 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-2}$
Otros tejidos	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$
Dosis efectiva equivalente (mSv/MBq)	$1,5 \times 10^1$	$1,9 \times 10^1$	$2,4 \times 10^1$

Cuadro 3.4: [1]Dosis absorbida por órgano, dependiendo de la actividad administrada y la retención del yodo en la tiroides(35 %-55 %)

3.4 Estimación de actividad retenida

Es posible estimar la actividad retenida sabiendo las condiciones iniciales en las que se encuentra el paciente, solamente se requiere de dos condiciones para poder determinarse

- La distancia de medición entre el paciente y el aparato debe ser lo más constante posible, de forma que la dosis medida a una distancia dada, se conserve en distintas etapas de la terapia. Para ello se puede hacer uso de marcas en el suelo o en la pared, dispuestas previamente de forma personalizada para cada paciente o permanente, estas marcas se deben encontrar dentro de las habitaciones dispuestas para el tratamiento o alguna habitación adecuada para contener la radiación emitida.
- Tomar la medición lo antes posible, de tal forma que la actividad no haya decaído por ningún medio biológico, es decir, cerca de los primeros minutos de la administración de dosis.

Con estas dos mediciones es posible conocer la actividad retenida en cualquier momento, midiendo la tasa de dosis de dicho momento, con la siguiente ecuación[6]

$$A_R = A_0 \frac{D}{D_0} \quad (3.21)$$

En la que A_R es la actividad en el tiempo medido.

A_0 es la actividad suministrada.

D es la tasa de dosis medida post-administración de la dosis al tiempo deseado.

D_0 es la tasa de dosis medida inmediatamente después de la administración de dosis.

Esta aproximación puede presentar variaciones debido a la distribución del fármaco en el paciente, pues distintas captaciones presentan distintas geometrías en la concentración de la actividad.

Por último, la tasa de dosis no se comporta igual que una fuente puntual, la cual está regida por la ley del inverso del cuadrado. Para distancias menores a 3 m se debe tener en cuenta el cambio en la geometría, para estos casos, se usa una aproximación tal que

$$D = D_1 x^{-\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

En la que D es la tasa de dosis en un punto x .

D_1 es la tasa de dosis a 1 metro de distancia.

x es la distancia[6].

Se debe tener en cuenta que esta aproximación puede presentar variaciones debido a las distribuciones, pues si la medida es tomada a 10 cm del abdomen presentará un valor menor que si es tomada a 10 cm de la tiroides, que es donde más captación del fármaco se presenta, sin embargo, esto también se ve afectado por el periodo de captación y vida media de distintos órganos, por lo que la aproximación dada en la Ec.(3.22) puede presentar grandes variaciones.

3.5 Detección de la radiactividad

Para la detección de la radiactividad se usan distintos instrumentos de monitoreo, medición de contaminaciones y determinación de actividad, los cuales usan distintos principios según sea su propósito. Nuestro interés principal en este trabajo se encuentra en los enfocados en medir contaminaciones o medidores portátiles en general.

Los detectores usan comúnmente las mediciones de actividad como B_α y B_β las cuales denotan las actividades medidas debido a las partículas α y β [10], respectivamente y se definen tal que

$$B_\alpha = A_s P_\alpha K_\alpha F^{-1} \quad (3.23)$$

$$B_\beta = A_s P_\beta K_\beta F^{-1} \quad (3.24)$$

Dónde A_s es la actividad de la fuente, P_α y P_β son las probabilidades de emisión α y β , respectivamente; K_α y K_β son factores de auto absorción por la geometría de la fuente y su montaje, estos valores suelen ser cercanos a 0,5; Por último, F es el área de medición, típicamente especificado en las características del aparato de medición o en su respectivo manual[16][17][18][19]. Estas aproximaciones teóricas permiten dar una idea de las posibles desviaciones futuras a la hora de las mediciones reales, pues el no disponer de la misma fuente de calibración ya es un factor que afecta a la ecuación debido a la geometría de medición.

Ahora bien, el procedimiento que se realiza para la calibración o control de calidad de los instrumentos de medición, debe ser reproducible y adecuado para cada instrumento, es decir, que el área de detección debe ser proporcional a la superficie radiactiva, así mismo la distancia entre la fuente y la superficie detectora (normalmente es proporcionada/sugerida por el fabricante de la fuente). El siguiente gráfico (Fig.3.2) representa un ejemplo de un arreglo óptimo para la calibración de un instrumento de medición de contaminación.

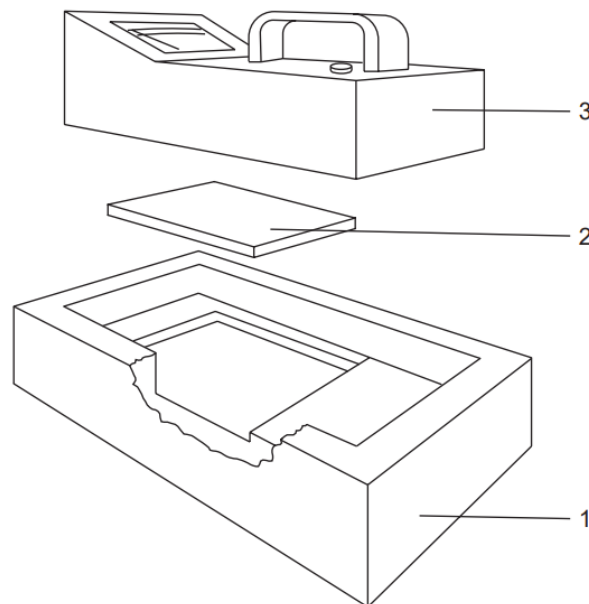


Figura 3.2: Arreglo para la calibración de detectores de contaminación. (1) soporte para garantizar la distancia y geometría constante, (2) fuente estándar de referencia plana, (3) detector de contaminación.

Normalmente, en el certificado de calibración, se da un factor CF_E , el cual

corresponde a la fuente emisora certificada, en actividad por unidad de área. Tal que

$$CF_E = \frac{S_A}{M - M_b} \quad (3.25)$$

En donde S_A es dado por el certificado de la fuente dado en actividad por unidad de área($S^{-1} \cdot cm^{-2}$), M son las cuentas detectadas por el monitor(S^{-1}) a la distancia específica del arreglo dado en la Fig 3.2 y por último, M_b son las cuentas de fondo o las cuentas que se miden cuando el detector se encuentra en un lugar sin fuentes de radiación significantes.

3.5.1 Incertidumbre, errores y desviaciones

La incertidumbre y los errores en las mediciones, normalmente se tiene como conceptos similares, incluso como sinónimos, sin embargo, se deben distinguir, pues realmente son conceptos distintos. Dado que el error y la incertidumbre se hacen evidentemente distintos cuando se habla de fenómenos estadísticos como lo es radiación, esto se debe a que los fenómenos internos de la radiactividad están altamente ligados con la probabilidad y aleatoriedad cuántica de las partículas.

La incertidumbre viene dada directamente por el fenómeno y su estadística intrínseca ligada a la propia medición o método de medición, mientras que el error viene dado por la desviación al valor real posible por medir, dado por errores de procedimiento, calibración o falta de consideraciones a la hora de realizar la medida, como podría ser cambios en la humedad, presión atmosférica, cambios de la geometría o posición de la fuente y/o el detector. En el siguiente gráfico(Fig.3.3) se representa la diferencia entre el error e incertidumbre.

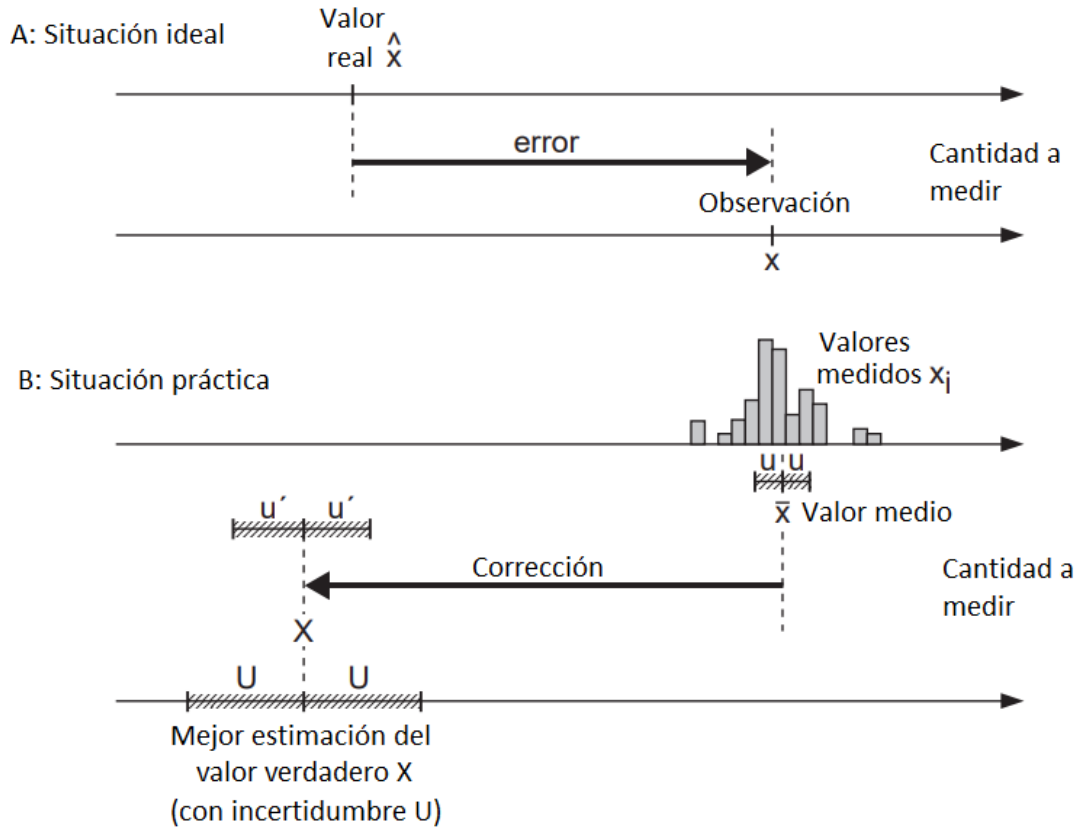


Figura 3.3: Representación de la diferencia entre errores de medición e incertidumbres asociadas a las medidas[10].

Para distinguir entre un tipo y otro se les clasifican como incertidumbre de tipo A y tipo B, el segundo se refiere al tipo de error dado por el error sistemático, es decir, que con una corrección se debería obtener el valor real y el primero se refiere a una variación en las mediciones dadas por el instrumento de medida, este último caracteriza el instrumento y genera el patrón de dispersión del mismo.

3.5.2 Incertidumbre tipo A

El tratamiento de este tipo de incertidumbres viene dado por el número N de mediciones realizadas por el instrumento, tal que

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N x_i \quad (3.26)$$

Para el cual se asume que todas las mediciones tienen el mismo peso o importancia. De esta forma se calcula el valor medio o promedio, el cual se caracteriza por la desviación estándar de los datos, dada por

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{N=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.27)$$

De la cual se puede obtener la varianza de la muestra de datos $s^2(x_i)$. Por otro lado, otra variable interesante es la desviación del valor medio, tal que

$$s(\bar{x}) = \frac{1}{N} s(x_i) \quad (3.28)$$

3.5.3 Incertidumbre tipo B

Para este tipo de incertidumbre se usa típicamente una representación estadística completamente aleatoria, es decir, con una distribución rectangular. Esto es debido a que esta incertidumbre se genera por condiciones que se suelen ignorar en las mediciones, como puede ser la humedad, presión atmosférica, inclusive puede tenerse en cuenta valores desconocidos.

Para el primer tipo de distribución (rectangular), teniendo en cuenta límites del error ubicados en $-L$ y L , la incertidumbre u_B estaría dada por

$$u_B = \frac{L}{\sqrt{3}} \quad (3.29)$$

Así mismo para una distribución tipo triangular se tiene que $u_B = \frac{L}{\sqrt{6}}$. Por último

para una distribución gaussiana, se debe tener en cuenta el nivel de fiabilidad de los datos, es decir, que para una confiabilidad del 95 % se tiene claros los límites de la incertidumbre, mientras que para un 99 % se dice que hay un límite de confianza.

Para el caso anterior, se usa en general la siguiente forma

$$u_B = \frac{L}{k} \quad (3.30)$$

En dónde k tiene valores de 2 o 3, respectivamente con los casos de límites de confianza descritos anteriormente. Se debe aclarar que al tratarse de este tipo de errores, no se tiene unos límites establecidos de los modelos a usar, por lo que se puede ser flexible en cuanto a las ecuaciones anteriores de la sección.

3.6 Propagación de errores

La propagación de errores es un concepto fundamental en estadística y se refiere al efecto de las incertidumbres (o errores) de las variables en la incertidumbre de una función basada en ellas. En el contexto de este trabajo, las variables son los valores de las mediciones experimentales que tienen incertidumbres debido a las limitaciones de la medición (por ejemplo, la precisión del instrumento) que se propagan debido a la combinación de variables en la función.

La propagación de errores se puede calcular utilizando la desviación estándar, que es la raíz cuadrada positiva de la varianza. La desviación estándar de las mediciones repetidas te dice acerca de la incertidumbre solo en la realización de la medición. La desviación estándar entre tus réplicas te dice acerca de la incertidumbre combinada en la repetición del experimento y en la remediación del experimento [14].

En términos matemáticos, si tienes una cantidad Q que es una función de varias medidas a , b , c , ..., cada una con una incertidumbre δa , δb , δc , ..., entonces la incertidumbre en Q , denotada como δQ , se puede calcular utilizando la fórmula de propagación de errores:

$$\delta Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial a} \delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial b} \delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial c} \delta c\right)^2 + \dots}$$

Donde $\frac{\partial Q}{\partial a}$, $\frac{\partial Q}{\partial b}$, $\frac{\partial Q}{\partial c}$, ... son las derivadas parciales de Q con respecto a a , b , c , ... respectivamente.

En nuestro caso, se usará esta teoría implementada en la función *error_integral* de la paquetería *scipy.integrate* en phyton, para calcular la propagación de errores en la integral de una función, sumando los errores en cada paso de los cálculos y luego tomando la raíz cuadrada del total. Esto nos proporciona una medida de la incertidumbre total en el resultado de la integral.

3.7 Diagrama de decaimiento del I-131

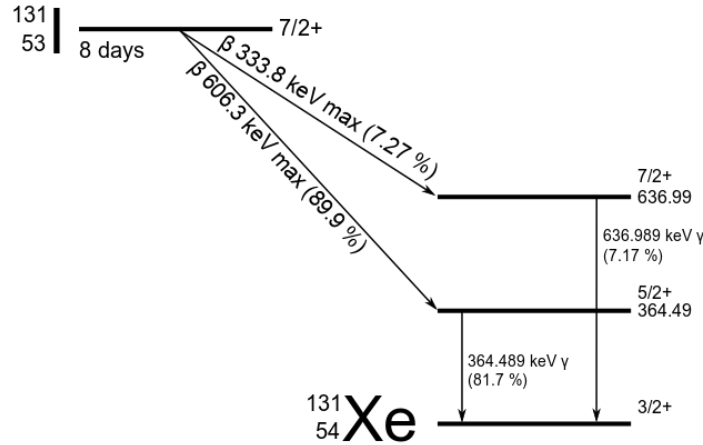


Figura 3.4: Diagrama de decaimiento del I-131

El yodo-131 (I-131) es un importante radioisótopo de yodo que se descubrió en 1938. Tiene una vida media de desintegración radiactiva de aproximadamente ocho días. El I-131 se desintegra principalmente (89 % del tiempo) en xenón-131 estable (Xe-131) en dos pasos, con la desintegración gamma siguiendo rápidamente después de la desintegración beta [15].

La desintegración beta es un proceso mediante el cual un neutrón en el núcleo atómico se transforma en un protón, liberando un electrón (partícula beta) y un antineutrino. En el caso del I-131, la desintegración beta produce partículas beta con una energía media de 606 keV y radiación gamma con una energía de 364 keV.

Debido a su modo de desintegración beta, el yodo-131 causa mutaciones y muerte en las células que penetra, y otras células hasta varios milímetros de distancia. Por esta razón, las altas dosis del isótopo a veces son menos peligrosas que las bajas dosis, ya que tienden a matar los tejidos tiroideos que de otro modo se volverían cancerosos como resultado de la radiación.

4. Método experimental e instrumentos de medición

Debido a que el planteamiento del problema exige unas condiciones no ideales en la toma de datos, se debe hallar la manera de mitigar lo mayor posible las variaciones entre los datos, además, existen los parámetros de medición de cada instrumento. Una vez considerado estos dos principales problemas, pasemos a la estimación de cada uno de ellos y las consideraciones que se tomaron en cuenta a la hora de realizar las mediciones.

4.1 Toma de datos

4.1.1 Instrumentos de medición

Para la estimación de dosis y actividad retenida en el paciente, se usan los siguientes instrumentos (datos extraídos de los manuales y repositorios de los respectivos fabricantes)

- Graetz - CoMo 170 El detector de contaminación se usó como referencia, en el análisis de datos. Especificaciones:
 - Eficiencia de detección para el I-131: 21 %
 - Superficie de medición: 170 cm^2
 - Cuentas de fondo: 15 cps - 20 cps
 - Rango de medición en la pantalla: 50000 cps
- Detector de radiación $\alpha - \gamma - \beta$ modelo 44-7 marca Ludlum
 - Eficiencias del 2 %, 10 %, 2 %, 7 %, 0,1 % y 7 % para el ^{14}C , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{99}Tc , ^{125}I y ^{239}Pu
 - Medición de fondo: 40 cpm
 - Ventana de medición: área activa 6 cm^2

- Sensibilidad: 2100 cpm/mR/hr
- Ludlum Modelo 14C(interfaz 202-330) acoplado al detector $\alpha - \gamma - \beta$ modelo 44-7
Se usa para la medición de dosis y estimación de actividad retenida en el paciente, este detector se usó en situaciones en las que no se contaba con el principal.
- Detector de radiación marca Ludlum Modelo 3001 acoplado al acoplado al detector $\alpha - \gamma - \beta$ modelo 44-7. Principal instrumento de medición para la tasa de dosis y estimación de actividad retenida. La respuesta del detector se da en la Fig. 4.1

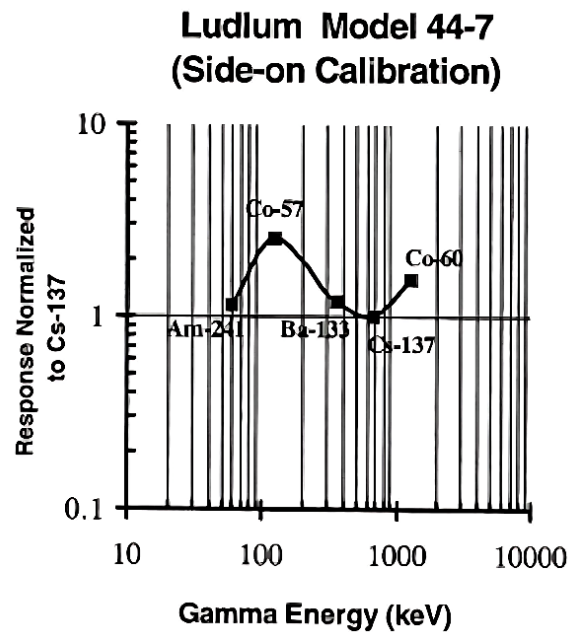


Figura 4.1: Curva de respuesta energética del detector $\alpha - \gamma - \beta$ modelo 44-7 de la marca Ludlum

4.1.2 Medición en pacientes

Para la toma de datos de los pacientes se debe seguir un protocolo estricto para garantizar que la medida fue tomada en las condiciones mas parecidas posibles.

El protocolo de medición se basa en los distintos horarios a los que se citan los pacientes para la administración de la dosis de yodo, adaptándose así a todos ellos y así

obtener una medición temporal lo más parecida posible entre estos. Además el protocolo se basa en la biodistribución del radiofármaco, pues el análisis de datos posterior nos permitirá estimar de una manera rápida la dosis retenida en la tiroides.

4.1.3 Metodología o protocolo de medición

El protocolo de medición en pacientes se establece a partir de los siguientes 2 minutos a la administración de la dosis, pues durante este periodo se espera que la cápsula de yodo se deposite en el estómago, pero que aún no se disuelva el material radiactivo, evitando así la absorción por el tejido. Una vez esta primera condición ocurre, se procede con la siguiente metodología

Se toma las mediciones con los siguientes detectores: CoMo 170 de la marca graetz y Model 3001 de Ludlum con la cámara de gas modelo 44-7 de la marca Ludlum.

- Se posiciona al paciente a 1 metro de distancia, usando marcas fijas en el suelo dispuestas en las habitaciones plomadas respectivas para el tratamiento.
- Se toma el dato de cuentas por segundo(cps), actividad(Bq) y dosis absorbida equivalente (mSv) de forma que el tubo de gas ionizado o película de estado sólido estén en paralelo con el paciente o perpendicular al suelo y a la altura del cuello(se toma medida de cps y Bq en modo I-131 para el CoMo y en cps y Sv/h para el Model 3001).
- Se toma la segunda fase con el paciente sentado.
- El detector se posiciona con el paciente sosteniendo la mirada de forma paralela al suelo
- Se posa el detector CoMo 170 sobre la barbilla del paciente y el pecho, formando una pendiente y captando las máximas cps generadas por la actividad retenida en la tiroides(se toma medida de cps y Bq en modo I-131).
- Por último, el detector Model 3001 o C14 se posiciona sobre el plano que se generó con el CoMo 170 en la medición anterior, de tal forma que la ventana de captación sea lo más similar posible a la medición anterior(se toma la medida en cps y Sv/h).

Este proceso se repite a las 3 horas y a las 22 horas después de la administración del radiofármaco, pues la disposición de horarios y finalización del tratamiento permite únicamente esta forma de seguimiento para todos los pacientes.

4.2 Control de calidad de los detectores

Antes de empezar las mediciones se debe garantizar la funcionalidad correcta de los distintos aparatos usados para la toma de datos. Para ello se sigue la guía "Programa de garantía de calidad del equipamiento de medicina nuclear".

4.3 Inspección física

Empezando con verificar estado físico del equipo y sus distintas partes

- Verificar el estado de los cables, que no presenten abolladuras o desgastes en sus recubrimientos de plástico.
- Verificar el estado de la cámara de captación, ya sea de estado sólido o una cámara de ionización.
- verificar el estado de la carátula del detector o pantalla digital, pues pueden presentarse manchas y/o píxeles dañados.
- Verificar el estado de las baterías del equipo, para los dispositivos digitales(CoMo 170 y Model 3001) se dispone de un medidor del nivel de la batería al encender el equipo y de manera constante en el pantalla; Para el equipo analógico se debe usar la herramienta de BAT-TEST, asegurándose de que la aguja llegue al final del rango de medición.

4.3.1 Mediciones

Para empezar con las mediciones que nos dirán el estado de la calibración del detector, se debe tener en cuenta una serie de parámetros para garantizar la fiabilidad de las mismas.

- Concordancia de la medida de fondo de radiación, para ello se debe verificar que la medida de fondo, es decir, sin ninguna fuente cercana o contaminación, sea acorde con los niveles dados por el fabricante.
- Constancia de las mediciones, así mismo se debe verificar que el detector realiza las mismas medidas para las mismas situaciones, todo esto, en cuanto a medición de fondo se trata.

Una vez se tiene una medida del fondo de radiación fiable, se debe proceder a garantizar la fiabilidad de la medición en una fuente de radiación convencional como puede ser un vial de Cs-137. Para ello se usará la siguiente ecuación

$$D = \frac{\Gamma A}{d^2} \quad (4.1)$$

Dónde $\Gamma = 1,032 \times 10^{-4}$.

A es la actividad de la fuente.

d es la distancia entre la fuente y el aparato de medición.

D es la tasa de dosis de la fuente A.

La cual será usada para hallar la correspondencia de tasa de dosis de la fuente, con el fin de comparar la medida dada por aquellos detectores de tasa de dosis.

Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta que para la toma de datos, se debe usar una geometría que sea equivalente a la superficie de medición, es decir, que en el caso de que se use un vial, se debe posicionar de la siguiente manera(Fig.4.2)



Figura 4.2: Forma geoméricamente adecuada de realizar la medición de una fuente con geometría vial, con un detector de geometría plana.

5. Pruebas y resultados

5.1 Control de calidad de los detectores

Para las pruebas del control de calidad, se usan todos los detectores anteriormente descritos

- Model 3001
- CoMo 170
- Model C14

Una fuente certificada

- Cs-137
- 207,1 mCi / 7,663 MBq
- Serial 1869-17-2
- Fecha de referencia 2016-05-01

Se usa la geometría descrita en la fig. 4.2 para el procedimiento de medición.

5.1.1 Inspección física

Para la inspección física de los detectores se realiza una verificación del estado del cable, pantalla, placa de estado sólido si aplica y funcionalidad de los botones, de cada uno de los detectores.



Figura 5.1: Verificación de funcionamiento del equipo Graetz CoMo-170



Figura 5.2: Verificación de funcionamiento del equipo Ludlum Model 3001

Se verificó el correcto funcionamiento de todos los botones y de la pantalla de los dispositivos, adicionalmente, la película de estado sólido del detector(fig 5.1), no presentó ninguna deformación o rasgadura que afecte la funcionalidad del mismo. Para los detectores de centelleo (fig 5.3 y fig 5.2), no se encontraron abolladuras que puedan inferir un daño interno del dispositivo o un posible escape de gas, así mismo el cable y sus conectores se encuentran en buenas condiciones.



Figura 5.3: Verificación de funcionamiento del equipo Ludlum Model C14

Luego, se verificó el nivel de las baterías respecto a los niveles aceptables, dados por el fabricante(Fig.5.4).

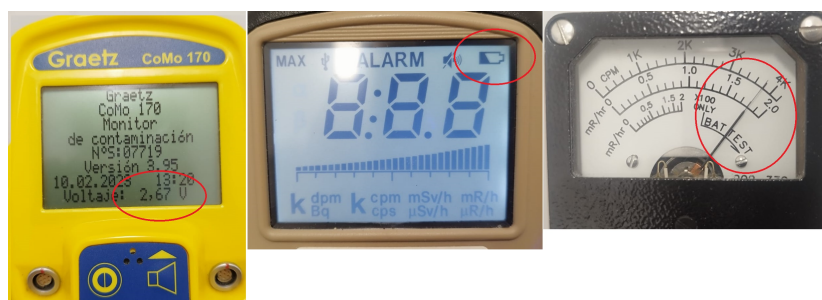


Figura 5.4: Verificación de baterías de todos los detectores usados

- Para el detector CoMo-170 de Graetz se requiere un nivel de batería superior a 2,1 V.
- Para el detector Model 3001 de Ludlum el nivel de batería se muestra constantemente en la pantalla, después de la verificación.
- Para el detector C14 de Ludlum la aguja debe llegar a la sección de “BATTERY Test”

5.1.2 Prueba de precisión

Para la prueba de precisión se utilizó la geometría como se ilustra en la figura 4.2, con una distancia entre el detector y la fuente de $10,0\text{cm} \pm 0,5\text{cm}$

Se realizaron mediciones cada 10 segundos para asegurar la estabilización del equipo, obteniendo los siguientes resultados:

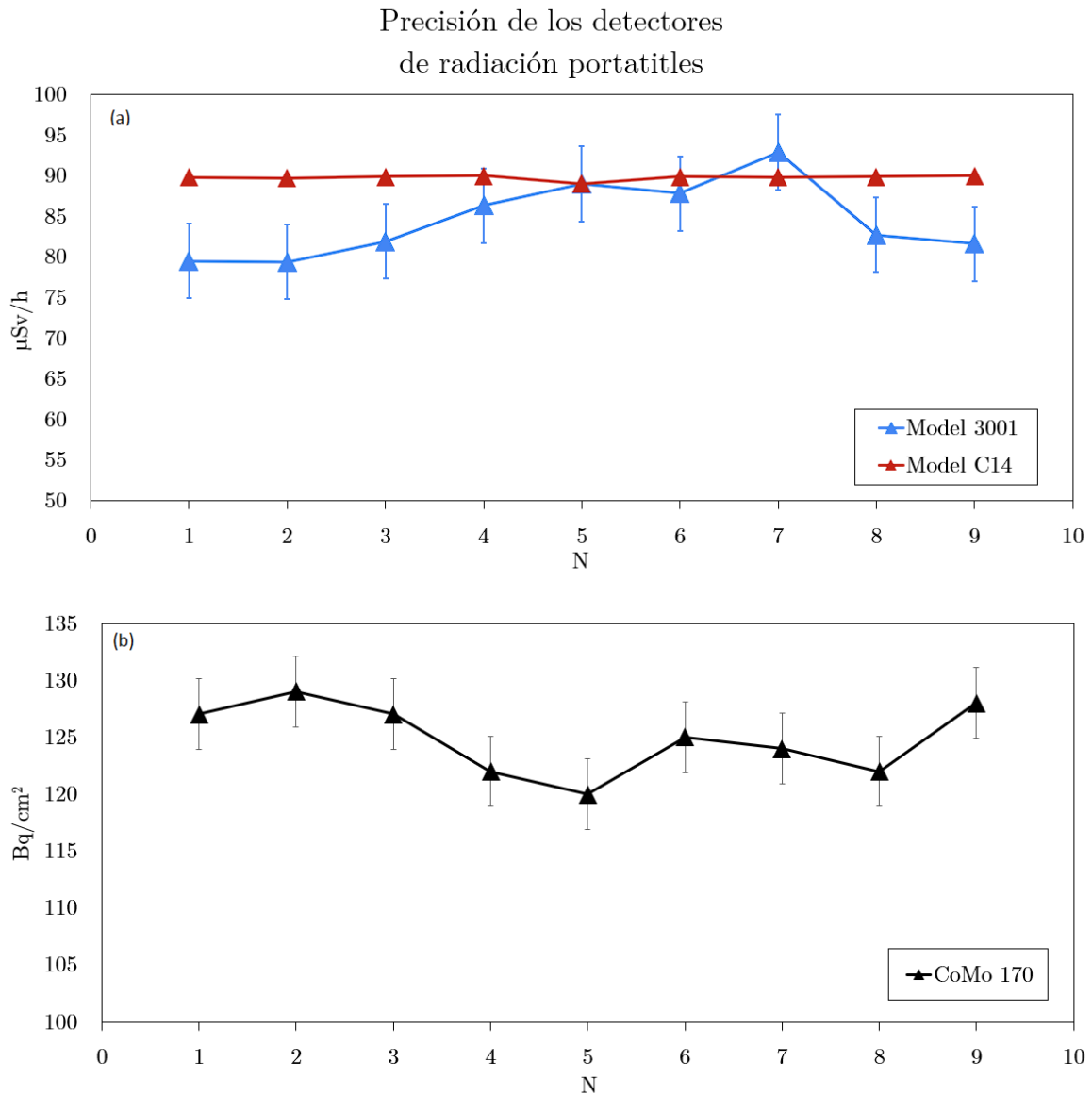


Figura 5.5: Verificación de la precisión de los detectores Model 3001(a), Model C14(a) y CoMo170(b)

Se obtuvo en la Fig.5.5 unos valores promedio, con sus respectivas desviaciones estándar medias de: $P_{M-3001} = 84,5 \mu Sv/h \pm 1,55 \mu Sv/h$,

$P_{M-C14} = 89,7\mu Sv/h \pm 0,10\mu S/h$ y $P_{C-170} = 124,8Bq/cm^2 \pm 1,03Bq/cm^2$. La baja desviación estándar del detector C14 genera que las barras de error(dadas en desviación estándar σ) no puedan visualizarse, pues los puntos de datos son de mayor tamaño.

5.1.3 Prueba de exactitud

Por último, se realizó la prueba de exactitud de los detectores, para ello simplemente se compara la medida obtenida en el apartado anterior con la teórica, una vez se apliquen los factores de conversión correspondientes.

Los datos de la fuente usada en este apartado son:

- Fuente de Cs-137
- Código de referencia RV-137-200U
- Actividad 207,1 μCi (7,663 MBq)
- Serie 1869-17-2
- Fecha de referencia 2016-05-01

Para lo cual se obtuvo la actividad a una distancia dada de la siguiente forma:

$$A = \frac{F_{\gamma}A_0e^{(F_m-F_i)\frac{\ln 2}{T_{1/2}}}}{d^2} \quad (5.1)$$

En la cual A es la actividad en el tiempo de medición, $F_{\gamma} = 7,79 \times 10^{-5}$ es el factor gamma, A_0 es la actividad reportada en la etiqueta de la fuente, F_m es la fecha de medición, F_i es la fecha de referencia de la fuente, $T_{1/2} = 30,05$ años es el periodo de vida media del radioisótopo y $d = 0,092$ m es la distancia entre la fuente y el detector (restando la profundidad entre la rejilla de protección y la película de estado sólido para el caso del CoMo 170).

Se obtuvieron las medidas de cuentas por segundo (cps) y tasa de dosis (mR/h y $\mu\text{Sv/h}$) a una distancia de 10 cm de la fuente, haciendo uso de la ecuación 5.1, se encontró un resultado de 109,5 cps, con un error porcentual con respecto al promedio de las mediciones del 13,3 %.

Para la tasa de dosis medida por los detectores se usa la siguiente ecuación:

$$D = 5,263 \times 10^{-6} AyE(\mu_{en}/\rho)/r^2 \quad (5.2)$$

Donde D es la tasa de dosis a la distancia r de una fuente con actividad A que emite a una energía pico E .

μ_{en}/ρ es el coeficiente de absorción de energía por unidad de masa.

y es el número de fotones con energía E emitidos por la fuente A .

Con esta ecuación se obtienen los valores de $58\mu\text{Sv/h}$ y $5,8\text{mR/h}$, con un error porcentual del 31,3 % y 35,4 % respectivamente. Cabe resaltar que dichos errores se deben, posiblemente, a varias fuentes. Una de ellas es la geometría de la fuente, pues dicha geometría es tipo vial, la cual es difícilmente parametrizable para un cálculo teórico preciso, a demás el material de cada parte del vial es distinto ya sea por su pigmento o su función. Otra fuente de error es la falta de un soporte estandarizado que permita mantener constante la distancia de forma asegurada, este soporte debería ser similar a uno usado para realizar las certificaciones de calibración previas.

Por último cabe resaltar que las desviaciones estándar calculadas en las fig 5.5 son suficientemente bajas como para realizar un cálculo normalizado de las medidas, pues el uso de una normalización de los datos mitiga el error de la prueba de exactitud y evita que afecte directamente las mediciones, resultados e interpretación de datos.

5.2 Análisis de datos de pacientes

En la siguiente gráfica(Fig. 5.6), se muestra la demografía de los pacientes atendidos durante el periodo de agosto del 2022 y febrero del 2023 en la Clínica Imbanaco SAS. Los pacientes de terapia con I-131 de alta dosis(>1110 MBq) del estudio tienen edades entre 22 y 69 años, 24 de ellos mujeres y 4 hombres.

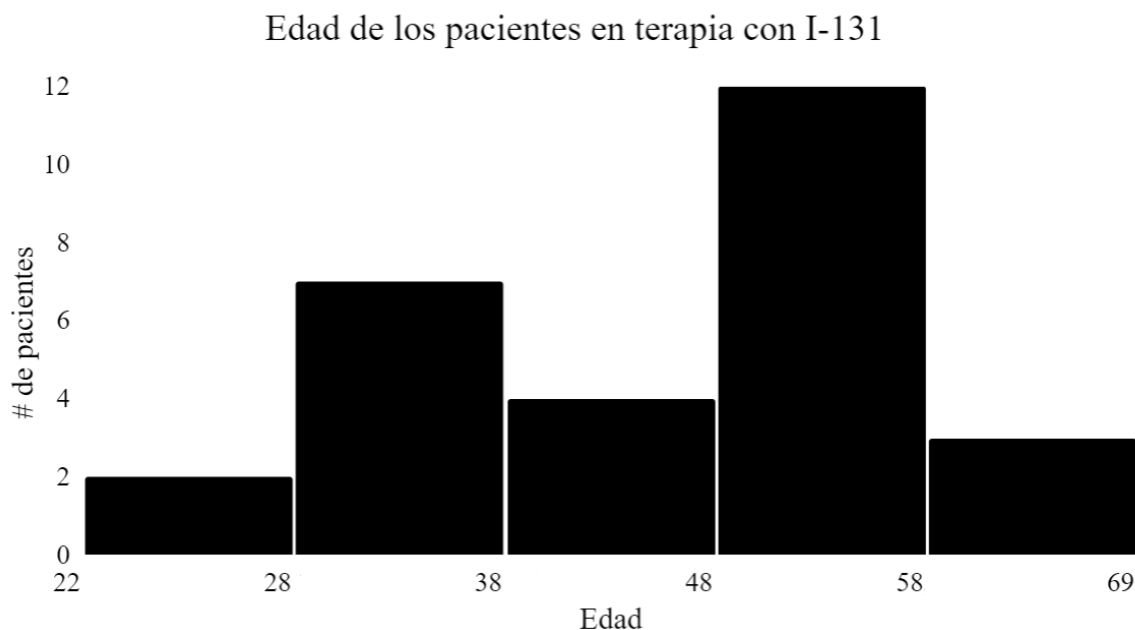


Figura 5.6: Caracterización demográfica de los pacientes bajo estudio.

Para el análisis de datos se tuvo en cuenta principalmente las medidas realizadas con el detector Model 3001, pues presentó una menor variación durante la toma de datos y cuenta con la capacidad de medir altas tasas dosis, lo que permitió realizar las medidas a 5 cm de la glándula tiroidea.

El detector CoMo 170 se usó para comparar y contrastar algunos datos abtenidos, pues el máximo de detección para este detector es de 50 kcps, lo cual es insuficiente dada la geometría de la segunda medición.

Para el detector Model C14, se debe aplicar el multiplicador de forma manual, para detectar la tasa de dosis de la tiroides, este multiplicador debe estar en x1000, haciendo que los datos obtenidos tengan una menor precisión y exactitud.

Para el modelo de actividad retenida se usó la Ec. 3.8, Para la cual, T_f es el tiempo de vida media físico del I-131 establecido en 192,96 horas, mientras que el T_b es tiempo de vida media biológico del fármaco en el paciente.

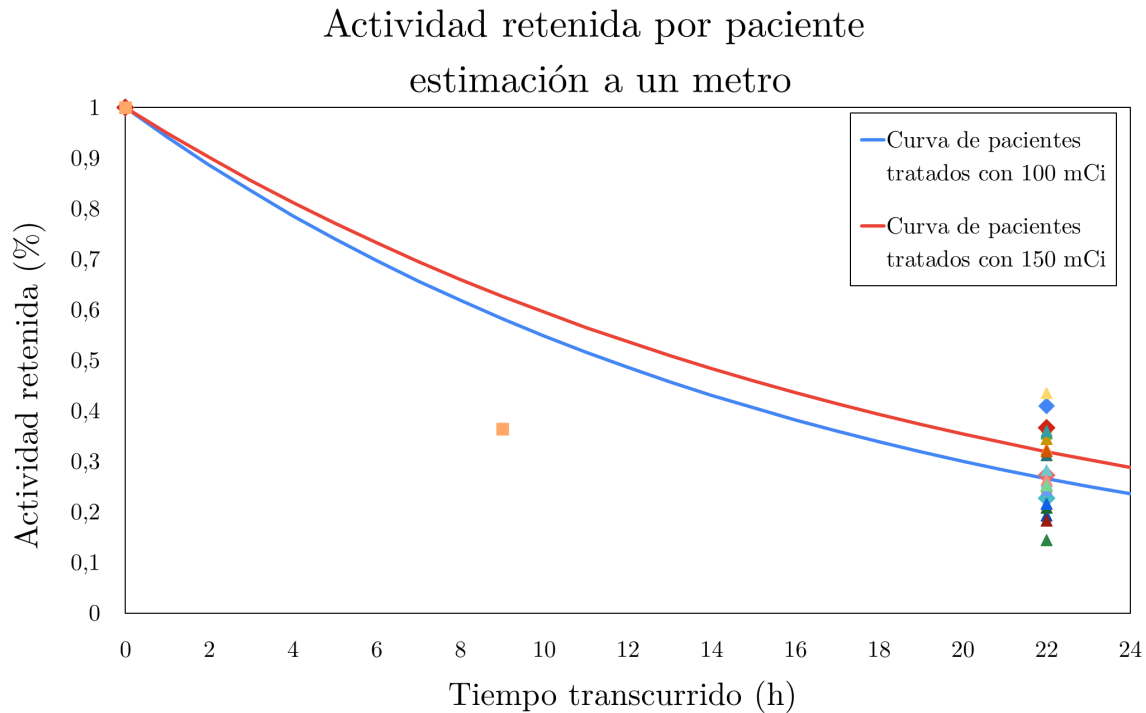


Figura 5.7: Caracterización de la actividad retenida por paciente a un metro.

Los punteros en forma triangular corresponden a pacientes suministrados con 3700 MBq (100 mCi), mientras que los rombos representan pacientes suministrados con 5550 MBq (150 mCi). El puntero cuadrado corresponde a un valor particular explicado más adelante.

Según los datos consignados en la Fig.5.7, se obtuvo una vida media T_b de 12,2 horas ($\sigma_{100} = 2,8h$) para los pacientes que recibieron una dosis de 3700 MBq (100 mCi) y de 14,3 horas ($\sigma_{150} = 3,6h$) para los pacientes cuya dosis corresponde a 5550 MBq (150 mCi). Se consideraron a 22 pacientes que recibieron una dosis de 3700 MBq (100 mCi), de los cuales 18 son mujeres y 4 son hombres. Para el grupo de los pacientes que reciben una dosis de 5550 MBq (150 mCi), se consideran 4 pacientes, de los cuales, todas son mujeres. Los dos pacientes restantes presentaron una captación anormal, dicha causa requiere de un seguimiento más detallado, por lo cual se opta por excluir sus datos.

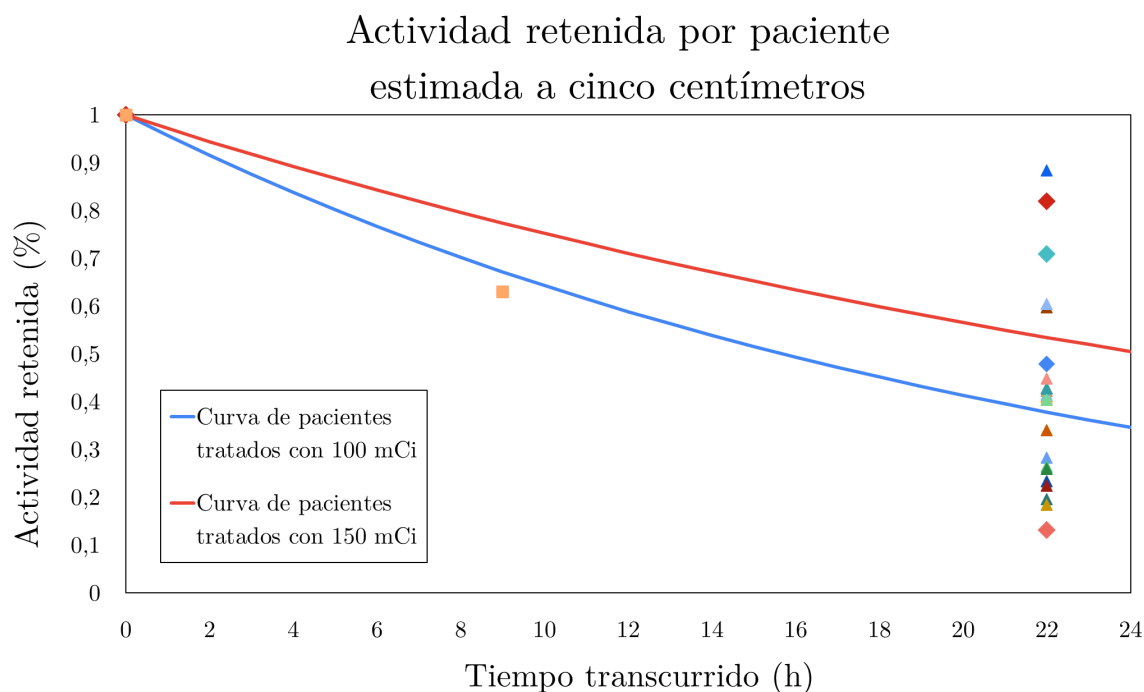


Figura 5.8: Caracterización de la actividad retenida por paciente a cinco centímetros de la tiroides.

Según los datos consignados en la Fig.5.8, se obtuvo una vida media T_{5b} de 17,10 horas ($\sigma_{100} = 7,3h$) para los pacientes que recibieron una dosis de 3700 MBq (100 mCi) y de 27,89 horas ($\sigma_{150} = 7,7h$) para los pacientes cuya dosis corresponde a 5550 MBq (150 mCi). Se excluyeron un total de tres casos (uno correspondiente a 100mCi y dos para 150mCi) para el cálculo de los dos errores anteriormente mencionados debido a que presentan una gran desviación debido a sus situaciones específicas.

Las principales diferencias con respecto a los estudios previos [6] se notan en los datos de la Figura 5.8. Cabe resaltar que la actividad retenida en este punto es mucho más elevada, ya sea por la calidad de la cirugía o por las condiciones de medida. Esto repercute en las recomendaciones a corta distancia, pues la dosis calculada en este rango cercano depende directamente de este decaimiento.

Los valores correspondientes a las medidas a las tres horas de administración de dosis no fueron tomados en cuenta debido a que sugieren un cambio en la forma de adquisición o biodistribución de dosis, esto provoca que deba ser modelado con una biexponencial

o triexponencial si se desea tener errores menores, sin embargo, así mismo se requiere de un seguimiento más detallado.

Para los pacientes con dosis administradas de 3700 MBq (100 mCi), se obtuvo un promedio de actividad retenida de 27,9 %, un máximo de 40,9 %, un mínimo de 22,7 %, una desviación estándar de 7,3 % a las 22 h y un tiempo de vida media biológica de 12,2h. Usando el modelo de la Ec. 3.8, se estima que para las 24 h estos pacientes presenten una retención del 23,6 %.

Para el grupo de pacientes con dosis administradas de 5550 MBq (150 mCi), el promedio de actividad retenida calculada es de 31,9 %, un máximo de 43,5 %, un mínimo de 22,7 %, una desviación estándar de 8,3 % a las 22 h y un tiempo de vida media biológica de 14,3h. De forma análoga, se estimó la actividad retenida según el modelo de la Ec. 3.8 a las 24 h presentando una retención del 28,7 %.

Por otro lado, se presentaron dos casos atípicos, el caso #1 se refiere a un paciente que presentó una captación baja de tiroides y en particular presentó la dosis necesaria para dar el alta a las 9 horas de tratamiento (puntero cuadrado en las gráficas 5.7 y 5.8), cabe resaltar que se trata de una paciente de 37 años, quien fue muy adherente a las recomendaciones de toma abundante de líquidos, esto permitió que cumpliera con el límite de tasa de dosis establecido de $7mRem/h$ para el alta dosimétrica.

El caso #2, corresponde a una paciente con metástasis, quien presentó una tasa de dosis particularmente alta en comparación con el promedio de las mediciones a 5cm de la tiroides, lo cual, es congruente con el juicio médico del rastreo post-terapia: *“Paciente con carcinoma de tiroides pobremente diferenciado T1bN0M1 metastásico óseo múltiple con alta captación de radioyodo, que ha presentado importante mejoría sintomática tras manejo instaurado. Se decide dar manejo con radioyodo 150 mCi tras retiro de levotiroxina por 3 semanas. En el rastreo post-terapia presenta compromiso metastásico óseo en las localizaciones descritas, asociado a una respuesta metabólica parcial con respecto al rastreo post-terapia previo de marzo de 2022”*. Sin embargo, cabe resaltar que la actividad retenida estimada a 1 metro de distancia no presenta grandes variaciones con respecto al promedio de los pacientes (27 %).

En cuanto a la interpretación de resultados individuales por paciente, usando la

Ec.3.9, se encuentra que para los pacientes que se les administró una dosis de 5550 MBq (150 mCi), el promedio de actividad retenida es de 28,7 % lo cual resulta en una estimación de 1591 MBq (43 mCi), por lo tanto, es una actividad mayor al 20 %(1110 MBq o 30 mCi) mínimo establecido para dar el alta dosimétrica del paciente. Por medio del análisis anterior, se recomienda que los pacientes deben ser internados de 6 horas a 24 horas más, acompañado de un énfasis mayor en la toma de líquidos, dado que esto puede acelerar el proceso de egreso.

Para el cálculo de la tasa de dosis emitida por el paciente, se usó la Ec. 3.15, de la cual, el estudio Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of the thyroid”[2] usó la exponencial tal que sus parámetros son:

$$D(t) = D_0(0.76e^{-1.39t} + 0.24e^{-0.16}) \quad (5.3)$$

Para los pacientes de ablación o primera dosis y a una distancia de 1m. Mientras que para los pacientes de seguimiento o retratamiento, se usan los siguientes parámetros en una monoexponencial:

$$D(t) = D_0e^{-0.93t} \quad (5.4)$$

Se debe recalcar que en el estudio anteriormente mencionado, se hace uso de muchas más mediciones para la caracterización de la curva, por lo que permite el uso de una biexponencial como la Ec.5.3.

Haciendo uso de los parámetros obtenidos en la fig 5.7 y en la fig 5.8, usando la ecuación monoexponencial Ec.3.15 y siempre y cuando el paciente emita una tasa de dosis máxima de 70 $\mu\text{Sv/h}$ en el momento del alta dosimétrica se cumple que:

- La tasa de dosis por permanecer a 1 metro de distancia es de 0,460 mSv/año.
- La tasa de dosis por dormir junto a la pareja, después del séptimo día del alta dosimétrica, es de 0,465 mSv/año

Para estos cálculos, se asume que la interacción inicia una hora después del alta dosimétrica debido a los trámites administrativos de la clínica. Esta interacción se

extiende hasta tres horas después de iniciada. Se reduce la exposición debido a esta interacción, ya que es la que más contribuye a la tasa de dosis. Sin embargo, sigue siendo una interacción obligatoria, pues el acompañante debe trasladar al paciente a su hogar. Para el segundo día, se espera una exposición de máximo 5 horas, lo cual admite realizar actividades de acompañamiento general con el paciente. Este día, el paciente mantiene una tasa de dosis elevada, por lo que se recomienda que continúe con la restricción. Para el tercer y hasta el día 14 (los cálculos se hicieron hasta el día 14), se establecen interacciones de 8 horas diarias. Las asunciones anteriores facilitan que el paciente lleve una vida más cómoda y asegurando la tasa de dosis recibida por su acompañante o pareja. De otro modo, acortar el periodo del primer día puede implicar que los pacientes que requieran de viajes de duración mediana no sigan las recomendaciones y, por otro lado, alargarlo puede suponer que las recomendaciones de los días consecuentes sean mucho más estrictas. Las asunciones físicas en este cálculo son que las interacciones se dan a una distancia constante de 1 metro fijo y se desprecian las interacciones cortas de segundos que pudiesen darse en este periodo.

La tasa de dosis calculada para dormir junto a la pareja se realiza asumiendo que el paciente sale cerca de las cuatro de la tarde, que es la cota de dosis máxima, lo que se asume igualmente en el caso anterior. El cálculo de esta recomendación se realiza de forma complementaria a la anterior, siendo la más cómoda dentro de la tasa de dosis anual para público general. En cuanto a las asunciones físicas de la interacción, se calcula un escenario en el que la pareja y el paciente duerman a 5 cm fijos. Se debe tener en cuenta que el dato de dosis se calculó con la tasa de dosis medida a 5 cm de la tiroides, la cual es el punto de máxima captación, por lo que en un escenario real se espera que la tasa de dosis pueda ser menor, sin embargo, se prefiere seguir con este escenario debido a que algunas posturas usadas para dormir en pareja exponen tejido sensible como la tiroides del acompañante, por lo que estas asunciones actúan como una cota de dosis máxima.

Para el resto de recomendaciones, se asumen interacciones similares con tiempos distintos y, para el caso de niños, se establece una recomendación similar a la mayor calculada. Para las recomendaciones de transporte privado, se recomienda que la persona que acompañe al paciente se ubique lo más alejado que el vehículo lo permita, por lo que se calcula con la tasa de dosis a un metro. Así mismo, se asume que la persona que comparta dicho transporte sea la misma para estos eventos; en caso de

ser la pareja, se debe tener estos periodos de transporte dentro de la primera recomendación. Para el transporte público, se calcula con la tasa de dosis a 5 cm y se asume que la o las personas expuestas serán un evento único, cambiando de día a día.

Tomando en cuenta lo anterior y que ambas exposiciones son a una misma persona, se obtiene una tasa de dosis de 0,926 mSv/Año. La tasa de dosis está lo suficientemente por debajo del límite de dosis por norma [13] para el público general de 1 mSv/año. Por otro lado, debido a que algunos de estos pacientes pueden llegar a requerir de una dosis adicional, la exposición anual puede ser mayor al cálculo anterior. Estos casos requieren de un análisis similar y más específico, según sus condiciones particulares.

De forma similar, se realizan los cálculos para un egreso de menor tasa de dosis, como lo pueden ser $60 \mu\text{Sv/h}$, $50\mu\text{Sv/h}$, $40\mu\text{Sv/h}$, $30\mu\text{Sv/h}$, $20\mu\text{Sv/h}$ y $10\mu\text{Sv/h}$. Para las cuales se obtuvieron las siguientes tablas con sus recomendaciones específicas. Para el caso de transporte público se asume un contacto cercano debido a las situaciones actuales de dicho transporte. Los tiempos de dichas tablas se ajustaron manualmente para una mayor comodidad de los pacientes con sus parejas, hijos y cuidadores.

Actividad retenida estimada MBq	Tasa de dosis $\mu\text{Sv/h}$	Tiempo para restringir el contacto y dormir a solas (d)	Tiempo que se permite el contacto con la pareja durante el primer día (h)	Tiempo que se permite el contacto con la pareja durante el segundo día (h)	Tiempo que se permite el contacto con la pareja después del tercer día (h)
1200	70	$7 \pm 20 \%$	$3 \pm 33 \%$	$5 \pm 25 \%$	$8 \pm 13 \%$
1100	60	$7 \pm 20 \%$	$5 \pm 25 \%$	$5 \pm 25 \%$	$8 \pm 13 \%$
1000	50	$7 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$8 \pm 13 \%$
900	40	$7 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$10 \pm 18 \%$	$12 \pm 11 \%$
800	30	$6 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$10 \pm 18 \%$	$12 \pm 11 \%$
700	20	$6 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$12 \pm 16 \%$	$12 \pm 11 \%$
600	10	$6 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$12 \pm 16 \%$	$12 \pm 11 \%$

Cuadro 5.1: Recomendaciones para los pacientes bajo tratamiento de I-131 para cáncer de tiroides, egresados de la Clínica Imbanaco SAS. Con respecto a la pareja o acompañante.

Actividad retenida estimada MBq	Tasa de dosis $\mu\text{Sv/h}$	Tiempo para restringir el contacto con niños <2 años (d)	Tiempo para restringir el contacto con niños 2-5 años (d)	Tiempo para restringir el contacto con niños <11 años (d)
1200	70	$9 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$6 \pm 20 \%$
1100	60	$9 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$6 \pm 20 \%$
1000	50	$9 \pm 20 \%$	$8 \pm 20 \%$	$5 \pm 20 \%$
900	40	$8 \pm 20 \%$	$7 \pm 20 \%$	$5 \pm 20 \%$
800	30	$8 \pm 20 \%$	$7 \pm 20 \%$	$4 \pm 20 \%$
700	20	$7 \pm 20 \%$	$6 \pm 20 \%$	$4 \pm 20 \%$
600	10	$7 \pm 20 \%$	$6 \pm 20 \%$	$4 \pm 20 \%$

Cuadro 5.2: Recomendaciones para los pacientes bajo tratamiento de I-131 para cáncer de tiroides, egresados de la Clínica Imbanaco SAS. Con respecto al entorno infantil.

Actividad retenida Estimada MBq	Tasa de dosis a 1m $\mu\text{Sv/h}$	Tiempo fuera del trabajo (d)	Tiempo de viajes en transporte privado por día* (h)	Tiempo de viajes en transporte público por día* (h)
1200	70	1 $\pm$ 13 %	2 $\pm$ 31 %	0,7 $\pm$ 43 %
1100	60	1 $\pm$ 13 %	2 $\pm$ 31 %	0,7 $\pm$ 43 %
1000	50	1 $\pm$ 13 %	3 $\pm$ 25 %	0,7 $\pm$ 43 %
900	40	1 $\pm$ 13 %	5 $\pm$ 19 %	1 $\pm$ 36 %
800	30	1 $\pm$ 13 %	10 $\pm$ 14 %	1 $\pm$ 36 %
700	20	1 $\pm$ 13 %	18 $\pm$ 10 %	2 $\pm$ 25 %
600	10	1 $\pm$ 13 %	20 $\pm$ 10 %	2 $\pm$ 25 %

Cuadro 5.3: Recomendaciones para los pacientes bajo tratamiento de I-131 para cáncer de tiroides, egresados de la Clinica Imbanaco SAS. Las recomendaciones de transporte deberán ser acatadas durante los primeros 4 días desde el alta dosimétrica.

Actividad retenida estimada MBq	Tasa de dosis $\mu\text{Sv/h}$	Desviación estándar total en las actividades de contacto estrecho con la pareja (mSv)	Desviación estándar total en las actividades con la pareja a un metro (mSv)	Desviación estándar total en las actividades con niños <11 años (mSv)	Desviación estándar total en las actividades de transporte público (mSv)
1200	70	0,67	0,35	0,08	1,21//0,15
1100	60	0,64	0,30	0,08	1,04//0,13
1000	50	0,62	0,25	0,11	0,87//0,11
900	40	0,57	0,20	0,11	0,82//0,10
800	30	0,95	0,15	0,21	0,61//0,08
700	20	0,91	0,10	0,18	0,56//0,07
600	10	0,87	0,05	0,18	0,28//0,03

Cuadro 5.4: Desviaciones estándar de los cálculos realizados en las tablas de recomendaciones 5.1 5.2 5.3.

En esta tabla 5.4 se encuentran los valores de desviaciones estándar en mSv por cada recomendación. Debido a la forma de cálculo que se llevó a cabo, se diferencian dos tipos de interacciones, una es contacto estrecho y la otra es contacto a un metro de distancia, estos valores se representan en la segunda y primera columna de la tabla 5.4, para el caso de los niños se opta por proveer el valor máximo de desviación, para

el caso del transporte se opta por una vía similar, tal que el primer valor corresponde al cálculo de desviación estándar del primer día y el segundo valor de la desviación estándar del último día, esto puesto que se presupone que al ser transporte público se expondrán distintas personas a la radiación emitida por el paciente.

Algunos valores de la tabla 5.4 como el de la columna 3 correspondiente a una tasa de dosis de $30\mu Sv/h$ puede verse elevado con respecto al de la dosis más alta como el de la misma columna correspondiente a una tasa de dosis de $40\mu Sv/h$, esto es debido a que el cálculo se hace desde unas horas antes, pues el valor de dosis incrementa considerablemente para contacto estrecho, esto resulta en un incremento de la desviación estándar total.

Adicionalmente de los valores en las tablas 5.2 5.1 y 5.3, se obtuvieron desviaciones porcentuales, dicho porcentaje corresponde al cálculo de las desviaciones estándar medias comparado con el valor de dosis calculado, es decir, es una comparación porcentual entre el valor de tasa de dosis obtenida y el valor de la desviación estándar media de la tasa de dosis obtenida durante dicha interacción.

6. Conclusiones

- Debido a la generalidad de las recomendaciones actuales, se ajustaron las recomendaciones, adaptando la guía [6] y estudios relacionados, en la Clínica Imbanaco SAS, para los pacientes que están en tratamiento de I-131, por medio de una caracterización de los datos de forma monoexponencial y diferenciada para los tratamientos de 3700MBq (100 mCi) y 5550MBq (150 mCi), los cuales representan un 84% y un 16% de la muestra respectivamente. Se ajustan las recomendaciones para el egreso, según la tasa de dosis que el paciente emita y se calculan los tiempos de distanciamiento, según distintas actividades sociales y tipo de población(pediátrica).
- Los controles de calidad de los detectores de radiación portátil se realizaron de forma satisfactoria, arrojando unos valores promedio, con sus respectivas desviaciones estándar medias de: $P_{M-3001} = 84,5\mu Sv/h \quad \Delta 1,55\mu S/h$, $P_{M-C14} = 89,7\mu Sv/h \quad \Delta 0,10\mu S/h$ y $P_{C-170} = 124,8Bq/cm^2 \quad \Delta 1,03Bq/cm^2$. Por otro lado, en la prueba de exactitud para el CoMo-170, Model 3001 y C14 arrojaron errores de $E_{Co-170} = 13,3\%$ $E_{3001} = 31,3\%$ y $E_{C14} = 35,4\%$ respectivamente. Los valores de desviación estándar son suficientemente buenos como para hacer un estudio normalizado, por otro lado, los errores en la prueba de exactitud pueden ser mejorados si se comparasen con los certificados de calibración anteriores y no con un modelo teórico.
- Se estimó la actividad retenida mediante el análisis de los datos medidos durante el periodo de estudio, se consideraron 26 pacientes, de los cuales se dividieron en tratamientos de 3700MBq (100 mCi) y 5550MBq (150 mCi). Para el ajuste se usa la Fig. 5.7 y el método de optimización Ec.3.10. Se obtienen las vidas medias biológicas de $T_b = 12,2h$ y $T_b = 14,3h$ a 1 metro de distancia, con una desviación estándar de $\sigma_{100} = 2,8h$ y $\sigma_{150} = 3,6h$ respectivamente para una dosis administrada de 3700MBq (100 mCi), mientras que para 5 cm se obtiene una vida media biológica de $T_{5b} = 17,1h$ y de $T_{5b} = 27,8$, con una desviación estándar de $\sigma_{100} = 7,3h$ y $\sigma_{150} = 7,7h$, respectivamente para los pacientes de 5550MBq (150 mCi).

- Se calculó la tasa de dosis que reciben las personas al realizar distintas actividades, teniendo en cuenta el tiempo que se pasa a 1 metro o 5cm de distancia del paciente, se realiza una serie de tablas de contenido, en las que se consignan de forma resumida 5.1, 5.2 y 5.3 y se modifican las recomendaciones existentes de la clínica, adicionalmente, se realizó una socialización de estos resultados al personal de la clínica para implementar estas nuevas recomendaciones.
- Debido a las altas retenciones estimadas en los pacientes de 5550MBq (150 mCi), se debe hacer un seguimiento especial tal que el paciente sea dado de alta únicamente cuando su actividad retenida estimada sea menor al 20 %. Para ello el plan de hospitalización y el personal clínico debe estar preparado para extender dicha estadía a un máximo de 48h en casos especiales.
- Se recomienda realizar un seguimiento de aquellos pacientes que presentan una alta captación del radiofármaco, pues esto puede indicar que requieran de una segunda o tercera dosis debido a que presentan una gran cantidad de tejido tiroideo. Par ampliar el análisis de datos se propone realizar un seguimiento de los líquidos que bebe el paciente, así como realizar una prueba de función renal y una medición en sangre, para poder estimar de una forma más precisa la actividad presente en el paciente.

Bibliografía

- [1] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 53, 1988, págs. 259-278.
- [2] Barrington S.F., Kettle A.G. y O'Doherty M.J. et al. "Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of the thyroid". En: *Eur J Nucl Med* 23, 123–130 (1996).
- [3] Roberto Cuenca. "La génesis del uso de las radiaciones en la medicina". Español. En: *Colombia Médica* (1997). ISSN: 0120-8322.
- [4] *Radiation Oncology Physics*. Non-serial Publications. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2005, págs. 16-21. ISBN: 92-0-107304-6.
- [5] Zheng Zhang et al. "Biodistribution and localization of iodine-131 labeled metuximab in patients with hepatocellular carcinoma". En: *Cancer Biology & Therapy* 5.3 (2006), págs. 318-322.
- [6] International Atomic Energy Agency e ICRP. *Release of Patients After Radionuclide Therapy*. IAEA, 2009.
- [7] Erick Mora Ramirez, Patricia Rodríguez y Maikol Salas Ramírez. "MNE06 ESTIMACION DE DOSIS ABSORBIDA EN PACIENTES QUE RECIBEN TRATAMIENTO TERAPEUTICOS CON 131 I POR CANCER DE TIROIDES". En: mayo de 2010.
- [8] Erick Mora Ramirez et al. "PRE04 IMPLEMENTACIÓN DE GUÍAS CON RECOMENDACIONES DE PROTECCIÓN RADIOLOGICA PARA PACIENTES CON CANCER DE TIROIDES DE RECIBEN TRATAMIENTO TERAPEUTICO CON 131 I". En: mayo de 2010. DOI: 10.13140/2.1.1313.2809.
- [9] P. Andreo et al. En: *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry*. Wiley-vch, 2017. Cap. 4.8.
- [10] P. Andreo et al. En: *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry*. Wiley-vch, 2017. Cap. 1.72-1.75.

- [11] Bhat M et al. “Dosing of radioactive iodine in end-stage renal disease patient with thyroid cancer.” En: *Endocrinology, diabetes & metabolism case reports*, 17-0111. (2017).
- [12] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 137, 2017.
- [13] Gobierno de Colombia. “Resolución 3100”. En: (2019).
- [14] Arvind Singh y Priyanka Chaturvedi. “Error Propagation”. En: *Resonance* 26 (2021), págs. 853-861. URL: %5E1%5E.
- [15] *Iodine-131 - Radioactive Decay - LiquiSearch*. [Online; accessed 20-September-2023]. 2023. URL: [4] (https://www.liquisearch.com/iodine-131/radioactive_decay).
- [16] Graetz. *Kontaminationsnachweisgerät GRAETZ CoMo-170 F*. URL: <https://graetz.com/produkte/kontaminationsnachweisgeraete/kontaminationsnachweisgeraet-graetz-como-170-f/>. (accessed: 20.03.2023).
- [17] Ludlum. *Alpha-Beta-Gamma Detector*. URL: <https://ludlums.com/products/all-products/product/model-44-7>. (accessed: 20.03.2023).
- [18] Ludlum. *General Purpose Survey Meter*. URL: <https://ludlums.com/products/all-products/product/model-14c>. (accessed: 01.09.2016).
- [19] Ludlum. *Multi-Detector Digital Survey Meter*. URL: <https://ludlums.com/products/all-products/product/model-3001#specifications>. (accessed: 20.03.2023).

Resumen de las recomendaciones generales de protección radiológica, para los pacientes egresados, de la Clínica Imbanaco SAS, de tratamiento con yodo radiactivo para cáncer de tiroides; Ejemplo de formato en folleto:

1. ¿Cuál es la precaución más importante?

- No se siente o permanezca junto a ninguna persona, tanto en casa como en el trabajo. Intente mantener una distancia de 1 metro como mínimo y, en caso de periodos de tiempo largos de más de una hora), no superar las __ horas para el primer día, __ horas para el segundo día y __ para el tercer día.

2. ¿Puedo mantener un contacto estrecho con mi pareja u otra persona en casa?

- Cualquier tipo de contacto estrecho, como los abrazos, la relación sexual o dormir en la misma cama, debe realizarse a partir del __ día. Lo ideal es que duerman en piezas separadas durante el periodo recomendado. No dejar las camas contiguas a la pared que las separa. Este tipo de interacciones son en las que más radiación se puede recibir, por lo que se debe tener especial atención.

3. 2. ¿Qué hay que hacer en presencia de embarazadas?

- El contacto con ellas debe reducirse al mínimo. En su presencia, permanezca a una distancia de 2 metros como mínimo.

4. ¿Es posible quedar embarazada?

- Parte del yodo permanecerá en su cuerpo durante cuatro meses. Durante este periodo no es aconsejable quedar embarazada.

5. ¿Puedo seguir viendo a mis hijos y ocuparme de ellos?

- El riesgo para los niños es mayor que para los adultos, se debe evitar el contacto cercano (Abrazos o periodos de más de una hora a menos de 2 metros de distancia) durante los primeros días, esto también varía dependiendo de la edad del niño.

- Sí el niño es menor a 2 años, se debe evitar el contacto cercano durante al menos __ días.
- Sí el niño tiene entre 2 y 5 años, se debe evitar el contacto cercano durante al menos __ días.
- Sí el niño tiene entre 6 y 11 años, se debe evitar el contacto cercano durante al menos __ días. Para las edades mayores a estos rangos se recomienda que siga las recomendaciones generales.

6. ¿Puedo seguir amamantando?

- El yodo radiactivo se transmite por la leche materna durante mucho tiempo, por lo que debe interrumpirse completamente la lactancia.

7. ¿Y si mi mujer está embarazada?

- En tal caso, debe evitarse el contacto estrecho durante el periodo recomendado para niños menores a 2 años(__ Días).

8. ¿Son las precauciones también aplicables también a las personas mayores de 60 años?

- Para los mayores de 60 años el riesgo es mucho menor que para otras personas, por lo que las precauciones especiales son menos importantes.

9. ¿Puedo recibir visitas?

- Las visitas breves de una duración inferior a dos horas no plantean problemas. Manténgase a una distancia de 2 metros y tenga en cuenta que es mejor evitar el contacto estrecho y las visitas de niños pequeños y mujeres embarazadas.

10. ¿Puedo ir a trabajar?

- La mayor parte de los pacientes puede ir o trabajar. Si, por la naturaleza de su trabajo, tiene que permanecer a menos de 2 metros de distancia de lo misma persona durante más de dos horas al día, siga las recomendaciones generales durante el tiempo estipulado(__ Días). En cualquier caso, mantenga informado a su jefe.

11. ¿Qué debo hacer si soy instructora en una guardería?

- El personal de guarderías, u otras personas que mantengan un contacto estrecho con niños pequeños durante las horas de trabajo, no irá a trabajar, siguiendo las recomendaciones según la edad de los infantes en su entorno (__ Días).
12. ¿Puedo asistir al cine o a otros espectáculos?
- Evite la asistencia a cines u otros actos sociales en los que deba permanecer cerca de otras personas durante más de uno hora.
13. ¿Puedo utilizar el transporte público?
- Durante 4 días, sus viajes en transporte público no deberían durar más de __ minutos. Sólo se realizarán viajes más largos si es completamente necesario. En tal caso, intente sentarse solo. Si el viaje es más largo, consulte a su médico o al oficial de protección radiológica (OPR).
14. ¿Puedo viajar en taxi?
- Siéntese en la parte trasera en el lado opuesto al del conductor. No viaje durante más de __ horas con el mismo conductor.
15. ¿Puedo compartir los sanitarios con otras el personas? Sí, pero no debe derramarse orina. Por ello, hago sus necesidades sentado/a (también los hombres). Seque siempre sus genitales con papel higiénico y vaciar tres veces el baño. Lávese las manos inmediatamente, incluso cuando sólo haya orinado.
16. ¿Y los cubiertos, vajilla, ropa de cama, toallas, etc.?
- El yodo radiactivo también sale del cuerpo de los pacientes a través de la saliva y el sudor, por lo que no se compartirán con otras personas los cubiertos, la vajilla, las toallas, la ropa de cama, etc. Después de lavados, no presentan ningún riesgo y no hay necesidad de lavarlos por separado.
17. ¿Qué hacer en caso de hospitalización?
- Si tiene que ir al hospital de manera imprevista, diga a su médico que ha sido tratado recientemente con yodo radiactivo, incluso si se trata del mismo hospital en que ha recibido el tratamiento.