



Programa piloto de vigilancia radiológica individual (dosimetría interna) en trabajadores ocupacionalmente expuestos a ^{131}I en estado volátil

Malory Johana Sánchez Buitrago

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Física

Bogotá, Colombia

2016

Programa piloto de vigilancia radiológica individual (dosimetría interna) en trabajadores ocupacionalmente expuestos a ^{131}I en estado volátil

Malory Johana Sánchez Buitrago

Tesis o trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Física Médica

Director(a):

M.g Mauricio Andres Arciniegas Álvarez

Codirector:

D.r. rer. nat Luis Agulles Pedrós

Línea de investigación:

Protección Radiológica

Grupo de Investigación:

Grupo de Física Médica UNAL-B

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2016

“La mayoría de la gente dicen que el intelecto es lo que hace a un gran científico. Están equivocados: es el carácter”

Albert Einstein

Agradecimientos



Dentro del arduo camino recorrido a lo largo de estos años de vida, me resta por tratar de retribuir en este breve mensaje primero a Dios por permitirme la fortaleza y valentía necesaria para culminar esta etapa; segundo a mis padres Yolanda Buitrago y Luis Fernando Sánchez por su dedicación e incondicional apoyo, tercero a el director y codirector de este trabajo final de maestría: M.Sc Mauricio Arciniegas y Dr rer.nat Luis Agulles, cuarto a mis compañeros de maestría (amigos de tardes arduas de estudio y risas), Sexto a la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá y por último pero no menos importante al ser que dio la dirección y sentido a mi vida (mi niño grande);Lok'tar ogar!.

Resumen

Dentro de la existencia y conformación de un programa de vigilancia radiológica individual, debe existir una normalización de uno o varios métodos de detección de la actividad incorporada cuando existe la posibilidad que tras la manipulación de ^{131}I se presente contaminación interna. En este caso particular se opta por un método directo de medición como lo es la espectrometría gamma. Estas medidas deben tener en cuenta una serie de verificaciones que puedan asegurar un método de ensayo apropiado para el propósito establecido y permitir evaluar con un grado de certeza la medición de actividad incorporada que estimará la dosis efectiva comprometida a través de la incorporación en tiroides.

De esta manera y siguiendo las recomendaciones presentadas por el Organismo Internacional de Energía atómica (OIEA) que debido al riesgo radiológico existen con la manipulación de ^{131}I , se hace necesario llevar un consolidado de los registros frente a las posibles estimaciones de incorporaciones, evaluando la exposición ocupacional en vista a mejorar su práctica laboral o tomar restricciones en caso de que la medida de exposición interna resulte considerable.

A su vez se deberá tener en cuenta la pertinencia o no del diseño de un programa de vigilancia radiológica rutinario, con tal fin se propone un criterio matemático para conocer si necesariamente se debe llevar a cabo, así como el seguimiento a las labores que son desempeñadas por las personas involucradas en la directa manipulación de ^{131}I . Este seguimiento se realizará en la radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología INC, (Bogotá Colombia).

Palabras clave: Programa de Vigilancia Radiológica, actividad incorporada, espectrometría gamma, Organismo internacional de Energía atómica, exposición ocupacional.

Abstract

Within the existence and conformation of an individual radiologic vigilance program, there must be the normalization of a detection method (or many methods) for the built-in activity when there is a risk to get internal contamination after handling the ^{131}I . In this particular case a direct spectroscopy measurement is chosen. These measures should keep in mind a series of check-ups able to ensure an appropriate assay method for the established purpose and to allow accurately assessing the measure of incorporated activity that will estimate the effective doses compromised of the incorporation activity in thyroid glands.

In this way, and following the recommendations presented by the International Atomic Energy Agency (IAEA), it's made necessary to have a consolidated registry with the possible incorporation estimates, because of the radiologic risk present with the handling of ^{131}I . Assessing the occupational exposition in hopes to improve its working practice or taking restrictions should the exposition measure results noteworthy.

At the same time it should be kept in mind the relevancy of designing a routine radiologic vigilance program, with such objective it is purposed a mathematical standard to find out if it's necessary to accomplish it, along the monitoring on the work done by people involved in the direct handling of ^{131}I . This monitoring will be performed in the radio-pharmacy within the Instituto Nacional de Cancerologia INC, (Bogotá Colombia).

Keywords: Radiological Vigilance Program, incorporated activity, gamma spectrometry, International Atomic Energy Agency, occupational exposition.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XIV
Lista de abreviaturas, acrónimos y símbolos	XVI
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Situación Radiofarmacia Instituto Nacional de Cancerología (INC)	5
1.3 Objetivos del programa de vigilancia radiológica	6
2 Diseño del programa de vigilancia radiológica empleado en la instalación	8
2.0.1 Responsable de las mediciones	9
2.1 Evaluación de las dosis individuales de los trabajadores de la radiofarmacia.	12
2.1.1 Información biocinética del ^{131}I	13
2.1.2 Vigilancia radiológica de las labores involucradas en la manipulación de ^{131}I	14
2.1.3 Vigilancia radiológica de las labores especiales en las que se encuentra involucrada la manipulación de ^{131}I	14
2.2 Método de medición	15
2.2.1 Factor decisión	16
2.2.2 Establecimiento de los niveles de las dosis incorporadas [39]	17
2.2.3 Establecimiento de la frecuencia del programa de vigilancia de incorporación.	19
3 Metodología de medición empleada en el programa de vigilancia radiológica individual	21
3.1 Consideraciones iniciales en la calibración del equipo	21
3.2 Descripción de los recursos usados	22
3.3 Consideraciones para la medición del trabajador	23
3.3.1 Revisión de los parámetros del detector tipo sonda	24

3.3.2	Medición del fondo radiactivo	25
3.4	Medición de la eficiencia de ^{131}I con ^{133}Ba para la geometría en dosimetría interna	26
3.5	Valoración de la actividad mínima detectable (AMD) para dosimetría interna	28
3.6	Valoración de actividad incorporada con modelos estandarizados y evaluación de dosis efectiva comprometida	29
3.7	Acciones a tener en cuenta en el registro de las medidas	30
4	Resultados de las mediciones del programa de vigilancia radiológica individual	31
4.1	Preparación del trabajador para la medida	31
4.2	Consolidación de los registros dosimétricos institucionales	33
4.3	Resultados eficiencias medidas e incertidumbres para el ^{133}Ba y ^{131}I	35
4.4	Evaluación de los periodos de monitoreo medidos	36
4.5	Calculo de Incertidumbres en las magnitudes involucradas en el resultado de la actividad medida al trabajador	37
4.6	Cálculo de incorporaciones y dosis efectivas comprometidas	42
5	Conclusiones y recomendaciones	44
5.1	Conclusiones	44
5.2	Recomendaciones	46
	Bibliografía	47
6	Instructivo para la calibración del equipo CAPTUS 3000	51
7	Descripción de la actividad para realizar dosimetría interna a trabajadores de la radiofarmacia ocupacionalmente expuestos a ^{131}I	62
8	Implementación del programa de vigilancia radiológica, para trabajadores en radiofarmacia.	68
9	Calibración equipo para dosimetría internade trabajadores ocupacionales de Radiofarmacia	76

Lista de Figuras

2-1.	Plano áreas controladas Radiofarmacia INC	10
2-2.	Bulto externo y blindaje Vial ¹³¹ I	11
2-3.	Cabina y área dedicada a la manipulación de ¹³¹ I	11
3-1.	Fuentes Tipo lápiz para la calibración de la sonda Captus ¹³¹ I	23
3-2.	Fuentes tipo gotero para la calibración de la sonda Captus ¹³¹ I	23
3-3.	Maniquí para calibración de sonda del equipo Captus 3000 ¹³¹ I	24
3-4.	Ejemplo de archivo que muestra los resultados de la calibración ¹³¹ I	25
3-5.	Esquema para corrección de cuentas usando método de las tres ventanas, LS: lado inferior, US; lado superior, PP: Pico principal. Figura extraída de [38]	27
3-6.	Acciones a tomarse de acuerdo a la medida obtenida en el trabajador	30
4-1.	Geometría de medición trabajador de radiofarmacia	32
4-2.	Ejemplo de espectro obtenido en la medición de TOE	33
4-3.	Registro medidas de Dosimetría interna para trabajadores radiofarmacia pág 1	34
4-4.	Registro medidas de Dosimetría interna para trabajadores radiofarmacia pág 2	34

Lista de Tablas

2-1. Parámetros de manipulación en el proceso de ^{131}I	9
3-1. Especificación técnica del equipo usado para cuantificación de incorporaciones de actividad de ^{131}I	22
4-1. Eficiencias medidas de ^{133}Ba y ^{131}I	35
4-2. Actividades mínimas detectables en las fechas de calibración	36
4-3. Periodos de monitoreo por trabajador	37
4-4. Desviación estándar de los conteos para los TOE	39
4-5. Desviación de actividades incorporadas por trabajador	40
4-6. Resultados de las medidas actividad sobre los trabajadores monitorizados	41
4-7. Resultados de estimaciones de dosis efectivas comprometidas $E(50)$ para trabajadores monitorizados	43

Lista de abreviaturas, acrónimos y símbolos

Abreviaturas

Abreviatura	Término
Na(Tl)	Yoduro de Sodio, dopado con Talio

Acrónimos

Abreviatura	Término
INC	Instituto Nacional de Cancerología
E.S.E	Empresa Social de Estado
NBS	Normas Básicas de Seguridad
OIEA	Organismo internacional de Energía atómica
IAEA	International Agency of Nuclear Energy
ICRP	International Commission on Radiological Protection
TOE	Trabajador Ocupacionalmente expuesto
LAI	Límites Anuales de Incorporación
AMD	Actividad mínima Detectable
NDR	Nivel Derivado de Registro 2-7
NDI	Nivel Derivado de Investigación 2-9
RDI	Región de Interés
FWHM	Full Width at Half Maximum
MCA	Multi Channel Analyzer
CPS	Cuentas por Segundo

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Sv	Sievert	Sv	Dosis equivalente de radiación
A	Actividad	Bq	Número de desintegraciones radioactivas en unidad de tiempo
m	metro	m	Unidad de Longitud
h	hora	- -	Unidad de tiempo
N	eq:2.2.2	- -	Número de periodos de medición en el año
eV	Electrón- voltio	eV	Energía que adquiere un electrón en un punto en que el potencial eléctrico es de un voltio.
A	Actividad	Ci	Número de desintegraciones radioactivas en unidad de tiempo
E	eficiencia		Cantidad de radiación captada por el detector sobre el número total de radiación que inciden sobre él
T	Tiempo de Conteo	S	Cantidad de tiempo necesaria para obtener un determinado número de cuentas.
I	Incorporación	Bq	Presencia de material radioactivo en uno o más órganos
x	eq: 4-3	- -	Número de ocurrencias de un evento aleatorio

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Definición
β	Beta	Tipo de radiación
γ	Gamma	Tipo de radiación
μ	micro	Prefijo (10^{-6})
Υ	Gamma	Proporción de emisiones en la RDI
σ	Sigma	Desviación estándar
λ	Lambda	Promedio de ocurrencias de un evento

Subíndices

Subíndice	Término
f_{hs}	Factor de Protección radiológica asignado a las operaciones realizadas
f_{fs}	Factor forma físicoquímica del material radioactivo manipulado
f_{ps}	Factor de Protección radiológica del material radioactivo manipulado
A_j	Actividad total de material radioactivo manipulada anualmente
$e(g)$	Coefficiente de dosis por inhalación de material radioactivo
d_j	Factor Decisión 2-1
N_R	Nivel de Registro 2-3
N_I	Nivel de Investigación 2-5
$m(t_0)$	Fracción de incorporación que queda en el cuerpo
t_0	Tiempo estimado para la incorporación
C_T	Cuentas Totales
C_{Ls}	Cuentas netas en la ventana inferior
C_{us}	Cuentas netas en la ventana superior
C_{pp}	Cuentas del pico principal.
C_f	Cuentas de Fondo
E_{eq}^{131I}	Eficiencia equivalente de ^{131}I
E_{133Ba}	Eficiencia ^{133}Ba
A_{T-131}	Actividad a un tiempo de conteo T de ^{131}I
C_{T131I}	Conteo neto en el trabajador para las Regiones de interés del ^{131}I
\bar{X}	Media aritmética para un número de datos
N_i	Numero de datos en una muestra
X_i	Dato i-ésimo de la muestra
σE_{eq}^{131I}	Desviación estándar de la eficiencia de ^{131}I
σE_{133Ba}	Desviación estándar de la eficiencia de ^{133}Ba
σY	Desviación estándar del porcentaje de emisión en el ROI 2
$C_{TOE_{RDR_i}}$	Valor cuentas netas del trabajador en la i-ésima RDI
σC_{TOE}	Desviación estándar de las cuentas netas del trabajador
$\sigma_f(R_s)$	Desviación estándar en las tasas de conteo en cada una de las RDI definidas
$C_{RDI_{iTOE}}$	Cuentas obtenidas en cada una de las RDI para el trabajador.
$t_{conteo_{toe}}$	Tiempo de conteo del trabajador
$t_{conteo_{fondo}}$	Tiempo de conteo del fondo radioactivo
$C_{RDI_{i_fondo}}$	Cuentas por segundo obtenidas en cada una de las RDI en el fondo radioactivo
$\sigma(C_{TOE})$	Desviación estándar para las cuentas en el TOE
σA_{mtoe}	Desviación estándar obtenidos en la actividad medida
$Var(x)$	Media de las desviaciones cuadráticas de una medida

Símbolos químicos

Símbolo	Elemento
^{99m} Tc	Tecnecio 99 metaestable
⁹⁹ Mo	Molibdeno 99
⁶⁸ Ga	Galio 68
¹⁸ F	Flúor 18
¹³¹ I	Yodo 131
⁴⁰ K	Potasio 40
¹³³ Ba	Bario 133
¹³⁷ Cs	Cesio 137
¹⁵² Eu	Europio 152

1. Introducción

Dentro de las labores que comúnmente son realizadas en una radiofarmacia centralizada, como la del Instituto Nacional de Cancerología, (INC) E.S.E, ubicada en la ciudad de Bogotá, Colombia, se puede encontrar desde la elución de generadores de ^{99}Mo - ^{99m}Tc , de ^{68}Ga la síntesis en ciclotrón de ^{18}F , la marcación del ^{99}Tc , con variadas moléculas, entre otros; o como en éste caso particular la manipulación ocupacional de ^{131}I empleado en la medicina nuclear para el tratamiento de hipertiroidismo de acuerdo a lo especificado por el Doctor Rivero en la referencia [37].

El principal riesgo que existe en el manejo de ^{131}I consiste en el estado físico-químico que llega a las instalaciones de la radiofarmacia para su manipulación (líquido); otro factor importante es la actividad solicitada por parte del centro, esto debido a los diferentes cambios de temperatura y presión en su producción, transporte y manipulación, que se producen desde su fabricación hasta su arribo final en la cabina de manipulación de la radiofarmacia.

Las respectivas variaciones en su estado original provocan como consecuencia que la presión del vapor inicialmente contenida en el vial en que fue confinado el material producto del proceso de fisión nuclear, y de la sublimación del material de acuerdo a lo mencionado por el autor Pigford en la referencia [25], sea mayor cuando llega al área donde será alistado para su manipulación, permitiendo que exista una mayor probabilidad de escape de los diferentes tamaños de partícula que coexisten en el vapor saturado de ^{131}I tal como se especifica en la referencia de la autora Howard [21].

Debido a la naturaleza del ^{131}I en su estado particulado o volátil y el proceso oxidativo que ocurre para volver a su forma de yodo elemental como lo menciona la referencia de Howard [21], coexisten al mismo tiempo con el ^{131}I en estado líquido, moléculas libres de yodo radiactivo $^{131}\text{I}_2$ dentro del vial, el cual cuando se manipula en un área determinada, es afín por su alta electronegatividad a formar enlaces con la molécula de Oxígeno O_2 , formando así compuestos volátiles radiactivos en el aire de las áreas de preparación.

Adicionalmente el ^{131}I que llega en solución concentrada a la radiofarmacia es una solución de Ioduro ^{131}I de sodio como se especifica en la ficha técnica del fabricante [1]; el ion Ioduro es el Anión de un ácido fuerte y está totalmente ionizado en solución acuosa, el cual puede ser oxidado por el oxígeno atmosférico en una solución ácida como lo explica la autora Howard en la referencia [21], dicha reacción es catalizada por la luz, esto teniendo en cuenta que el vial en el que está contenido el material radiactivo es transparente y no oscuro tiene mayor probabilidad de que la reacción oxidativa exista.

Por tanto en las áreas de manipulación de ^{131}I , existe un riesgo de incorporación por vía aérea, tal como el que es especificado en el documento del Organismo Internacional de Energía Atómica citado en la referencia [8], esto quiere decir que cuando el trabajador o trabajadores se encuentren realizando el proceso de manipulación o limpieza de zonas, pueden inhalar una determinada cantidad de material radioactivo, de acuerdo a el modelo biocinético del yodo (independiente si la molécula es radioactiva o no), la cual puede incorporarse en uno o más órganos específicos de acuerdo a lo mencionado en la referencia de la Comisión internacional de Protección radiológica en su publicación [30], provocando una concentración elevada de este material en dicho tejido.

A su vez se deben tener en cuenta otro tipo de situaciones asociadas al riesgo de manipulación de un radionúclido volátil, como lo son las estrategias que por parte de la radiofarmacia se tengan para evitar las incorporaciones de material radioactivo (uso de elementos de protección personal respiratoria, cabinas de manipulación aisladas de los aires del trabajador, agentes reductores para evitar la presencia de formación de partículas volátiles, etc), que se encuentren ligadas al desarrollo normal de la práctica.

1.1. Antecedentes

Las Normas Básicas de Seguridad (NBS) del OIEA [9] GSR parte 3 publicadas en Agosto de 2014 mencionan como: “ Los empleadores deberán arreglar un seguimiento adecuado en la medida necesaria, para demostrar la eficacia de las medidas para protección y seguridad, para evaluar la incorporación de radionucleidos y las dosis efectivas comprometidas.” con este fin se pretende aproximar el criterio internacional de protección ocupacional mediante la elaboración y aplicación de las directrices en la restricción de exposiciones, a la radiación y la aplicación de las técnicas actuales de protección radiológica en el lugar de trabajo como lo menciona Puerta A. y colaboradores en la publicación [35].

Otro aspecto a tener en cuenta es que toda persona que labora en un área controlada o aquellos que transitan por ésta, tienen un riesgo de sufrir una exposición ocupacional significativa como lo especifica el OIEA en la publicación de las NBS [9] y por tanto deben ser considerados aptos para una posible monitorización individual. Dicha decisión se toma si la dosis efectiva comprometida es mayor o igual a 1mSv por año, este criterio aplica también para examinar si existe o no contaminación interna.

En armonía también con las recomendaciones establecidas en las NBS por el OIEA [9], la nueva normativa del Ministerio de Minas y Energía de Colombia emitida en la resolución número 90874 de 2014 [10], subsección 3.2.1, se adaptó para “*buscar determinar la definición de los límites de dosis cuando existan posibles cantidades de incorporación por medio de una herramienta de dosis in vivo*”.

De la misma manera en el año 2004 el OIEA en la publicación: Guía de Seguridad RS-G-1.2, “Evaluación de la exposición ocupacional debida a incorporaciones de radio nucleidos” [8], esta-

blece pautas al evaluar las condiciones de manejo, seguridad, tipo de radionúclido y la actividad manipulada total en el año, para verificar la necesidad o no de un estudio de monitorización, para lo cual se emplea el uso de tres factores, que intervendrán en la toma de decisión sobre si es necesario un programa de vigilancia radiológica individual.

Otro documento importante de reseñar es el Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. *ICRP PUBLICATION 130*, realizado por la comisión internacional de radioprotección o por su siglas en inglés (ICRP), del año 2015, donde se realiza una revisión de los coeficientes de dosis ocupacionales para la incorporación de radionucleidos por inhalación e ingestión, así como las principales consideraciones para la elaboración de un programa de vigilancia radiológica individual en trabajadores con riesgo de incorporación radioactiva [30].

Por otra parte, en documentos anteriores la ICRP propuso en su reporte número 78 “Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers ” [20] una alternativa para presentar la “evaluación adecuada de la exposición ocupacional interna resultante de incorporaciones de radio nucleidos como requerimiento esencial para el diseño, la planificación y la autorización de una instalación, para la optimización de la protección radiológica de los trabajadores, la protección radiológica operacional y para la demostración retrospectiva de cumplimiento con los requisitos reglamentarios”, que más adelante vendría a ser revisada en la publicación 130 del ICRP [30].

Vale la pena mencionar que anterior a la publicación No. 78 del ICRP se encuentran otra serie de documentos entre los cuales se tienen: la recomendación 30 [13] la cual, brindó información de los coeficientes de dosis y valores de los límites anuales de incorporación (LAI) para los trabajadores, así como la incorporación de los radionucleidos por inhalación e ingestión, haciendo referencia a las recomendaciones emitidas, la publicación No. 26 del ICRP [12] que introduce datos anatómicos y fisiológicos en un simulador físico de referencia sobre la captación de radiofármacos .

La Publicación 66 del ICRP [17] hace referencia a la inhalación de radionucleidos, con un modelo básico de anatomía que posteriormente es actualizado y revisado para los modelos biocinéticos de 31 isótopos seleccionados en las Publicaciones 56 [15], 67 [16] , 69 [18] y 71 [19]. Estos modelos originalmente, fueron tomados de la Publicación 30 [13] y modificados por la adición de las vías de excreción para mejorar las estimaciones de dosis en las paredes de la vejiga y de colon.

En cuanto al establecimiento del programa de vigilancia radiológica las publicaciones 54 [14] y 78 [20] brindan orientación sobre el diseño de programas de vigilancia y la adecuada interpretación de los resultados con el fin de estimar las dosis a los trabajadores después de la inhalación de radio nucleidos o ingestiones del mismo; los datos recopilados se adquieren en las personas que se encuentran en directa manipulación del radioisótopo, ya que son los individuos más probables en el lugar de trabajo en la que pueda producirse una incorporación detectable.

Otras publicaciones destacadas dentro del marco referencial del trabajo son: “Evaluation of internal exposure of nuclear medicine staff through in vivo and in vitro bioassay techniques” [33], “A methodology for auto-monitoring of internal contamination by ^{131}I in nuclear medicine workers” [40], “Direct Determination of Radionuclides in the Body Optimisation of Measurements

Parameters and Results Analysis” [32], “Assessment of intake and internal dose from iodine-131 for exposed workers handling radiopharmaceutical products” [27], “Internal dosimetry of nuclear medicine workers through the analysis of ^{131}I in aerosols” [28], en las cuales se examinan variadas metodologías para medición de trabajadores, la adquisición de los datos y el análisis de las medidas.

A nivel latinoamericano se encuentra el Informe Reunión de Expertos, realizado en Buenos Aires, en el año 2005, donde se pueden evidenciar diferentes aportes a la elaboración de un programa de vigilancia radiológica individual; tanto del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (Cuba) [11], como del grupo de Física Radiológica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín [35], encabezado por el director del grupo Doctor Anselmo Puerta.

Otras publicaciones adicionales del Profesor Anselmo Puerta a nivel regional lo son: El artículo “Recomendaciones para la medición de ^{131}I en la tiroides humana usando un detector de NaI(Tl) ” [36], “*The First Programme of assesment of occupational exposure due to intake of ^{131}I in the practice of nuclear medicine in Venezuela*” [34]; donde se evidencia la necesidad de evaluar las posibles incorporaciones de ^{131}I en trabajadores ocupacionalmente expuestos y las alternativas que existen para las mediciones que se realicen sobre estos.

Vale la pena aclarar que en la revisión bibliográfica encontrada no se incluye la exposición médica, ni la del público, y a su vez no se pretende validar consejos específicos sobre la vigilancia radiológica según lo especificado por la Guía de Seguridad RS-G-1.2 [8], para la generalización de todos los centros que manipulen una clase específica de material radiactivo o de ^{131}I , la finalidad consiste en adaptar las recomendaciones examinadas dentro del marco referencial al contexto operacional de la radiofarmacia Instituto Nacional de Cancerología E.S.E, así como adaptar lo especificado en la guía al orden propuesto por el OIEA a la presentación del siguiente trabajo final de maestría, la adaptación de la metodología de creación, calibración y análisis del programa de vigilancia radiológica para la instalación mencionada.

Por lo expuesto anteriormente, existe la necesidad de una orientación, planificación, y aplicación de un programa de vigilancia radiológica individual, con el fin de evaluar las condiciones y la cantidad de incorporación de cada uno de los trabajadores que laboran en la manipulación de ^{131}I , en el caso de que existiesen y así mismo poder realizar una evaluación de las dosis por incorporación del radionucleido a través de un método rutinario de medición o en caso de accidente radiológico; en cuanto a las medidas que se realicen a los trabajadores rutinariamente y posterior a las labores de manipulación del ^{131}I deberán tener en cuenta un diseño metodológico que pueda asegurar la fiabilidad de la medida de actividad incorporada en el cuerpo o en un órgano específico, siguiendo las recomendaciones presentadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) [8] y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) [30].

1.2. Situación Radiofarmacia Instituto Nacional de Cancerología (INC)

En el año 2015 el INC bajo la nueva resolución del Ministerio de Minas y Energía [10] se conformó una política de protección radiológica institucional para el centro, en la que se debía tener en cuenta que el empleador y/o empleado que perciban circunstancias las cuales puedan afectar negativamente a la protección y la seguridad de las labores que se desarrollan habitualmente en una instalación que maneje o este expuesta a radiación ionizante, según la referencia del OIEA [9] deben plantear una formalización de uno o varios métodos con el fin de evaluar y cuantificar el riesgo que al manipular material radioactivo se tiene por parte del personal ocupacionalmente expuesto; por tal razón se propuso plantear el mejor método para ofrecer un asesoramiento general de las condiciones de exposición para las que se debería establecer un programa especializado, a fin de evaluar las dosis de radiación provenientes de la radiación externa (manejo de fuentes abiertas o selladas) y de la incorporación de radionucleidos por cada trabajador en el documento propuesto por el organismo citado en la referencia [8], a esto se le denotó programa de vigilancia radiológica individual.

Los empleadores por su parte, al acogerse a la conformación de la política de protección radiológica, deberían establecer un programa de vigilancia radiológica individual, donde se garantice las herramientas para proceder a una monitorización radiológica adecuada en la medida que sea necesario, a fin de demostrar la eficacia de las medidas de protección y seguridad con las que ya cuenta el centro, por medio de una evaluación de la seguridad que indique las principales exposiciones o incorporaciones potenciales del trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

Por lo anterior y examinando el contexto de la radiofarmacia del INC se debe determinar qué trabajadores podrían estar sometidos a exposición debida a contaminación interna producida por un radioisótopo que pueda cambiar su estado de líquido (forma físico-química más conocida), a otro gaseoso en las áreas donde se realiza la manipulación del mismo; centrándose particularmente en la evaluación de dosis internas, es decir en la actividad incorporada de un radionúclido específico al organismo; puesto que existe la posibilidad que tras la manipulación del material radioactivo en estado líquido, el trabajador pueda inhalar pequeñas partículas o vapor radioactivo mientras realiza la preparación de la forma farmacéutica que será administrada posteriormente al paciente bajo prescripción médica.

Las medidas que se tomen sobre los trabajadores rutinariamente posterior a las labores de manipulación del ^{131}I deberán tener en cuenta una serie de verificaciones que puedan asegurar un método de ensayo apropiado para el propósito establecido y permitir evaluar con un grado de certeza la medición de actividad incorporada en el cuerpo o en un órgano específico, siguiendo las recomendaciones presentadas por el Organismo Internacional de Energía atómica en su referencia [8].

Lograr una evaluación de las condiciones del lugar de trabajo y de las exposiciones individuales a través de las dosis de los trabajadores expuestos de forma rutinaria o potencial a través de la

incorporación de material radioactivo, constituye una parte muy importante de cualquier programa de vigilancia radiológica para asegurar y/o garantizar unas condiciones radiológicas satisfactorias y un nivel de seguridad aceptable en el lugar de trabajo, como es mencionado por el grupo de Física Radiológica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín [35], más aún, cuando las condiciones de trabajo pueden generar riesgos potenciales de exposición por la falla de una o más barreras de seguridad en la manipulación del material radioactivo.

Dada la situación operativa de la manipulación de ^{131}I en las instalaciones del INC, se hace necesario llevar un consolidado de los registros frente a las posibles estimaciones de incorporaciones, evaluando la exposición ocupacional en vista a mejorar su práctica laboral o tomar restricciones en caso de que la medida de exposición interna resulte considerable; de la misma manera evaluando el concepto del programa de vigilancia radiológica individual, se deberá tener en cuenta la pertinencia o no del diseño del mismo para ser ejecutado de una manera rutinaria en las instalaciones, con tal fin se debe proponer un criterio matemático para verificar si necesariamente se debe llevar a cabo o no el seguimiento de las actividades de manipulación de ^{131}I que son desempeñadas por las personas involucradas en la directa manipulación de este radioisótopo, tal como lo argumenta el OIEA en su Guía de Seguridad [8].

1.3. Objetivos del programa de vigilancia radiológica

En el presente trabajo se pretende adoptar algunas de las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), sobre la medición de posibles incorporaciones de material radioactivo debida a exposiciones ocupacionales en el área de radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología E.S.E, que manipulen ^{131}I en la elaboración de cápsulas que son empleadas en el tratamiento médico de terapias de yodo radioactivo, con el fin de implementar el programa de vigilancia radiológica individual para los trabajadores de dicha área.

Como objetivos específicos se tienen:

- Planificación de un programa de vigilancia radiológica en Dosimetría interna a cargo del profesional especializado (Físico Médico de Medicina Nuclear y Oficial de Protección Radiológica), con el objetivo de determinar una estimación de la posible contaminación interna de los trabajadores que manipulen ^{131}I , en el área de radiofarmacia.
- Analizar las consideraciones fundamentales sobre la manipulación ocupacional en radiofarmacia del ^{131}I que se han de tener en cuenta para el control de las exposiciones internas en situaciones normales y accidentales.
- Aplicación y análisis de un consolidado dosimétrico interno donde se lleve una estadística de incorporaciones causadas en el área de trabajo con el fin de conocer la dosis total (interna

y externa), que el trabajador alcanza al realizar sus labores para realizar el estimado de dosis individual.

- Establecer un sistema de calibración para el detector usado en las mediciones directas de las actividades incorporadas sobre tiroides, para poder garantizar que la medida de esta se encuentre dentro de un rango adecuado de certidumbre por medio de patrones de medida conocidos y de la implementación de correcciones a la misma.
- Mejorar de acuerdo al análisis las prácticas laborales en el área de radiofarmacia correspondientes a los procesos de elaboración de las cápsulas de o dosificaciones¹³¹ I, reduciendo los posibles riesgos de incorporación que pueda tener el personal al realizar este tipo de procedimientos en condiciones normales o de incidente radiactivo.

Sustentados en el programa de protección radiológica del INC E.S.E en el cual se requiere emprender la evaluación de los implementos con los cuales cuenta el centro para la elaboración de la monitorización de dosis interna, los criterios que se tienen para decidir o no la pertinencia de un programa de vigilancia radiológica individual en el que se evalúe la incorporación de actividades, así como el acompañamiento permanente en la toma de datos posterior a la manipulación de yodo radiactivo, se pretende abordar una problemática reconocida, bajo una perspectiva de detalle técnico y orientativo acorde a la instalación.

En el Capítulo 2 se presentan en detalle el programa de vigilancia radiológica individual, donde se explicará la pertinencia de la monitorización individual para la instalación escogida.

En el Capítulo 3 se hace una descripción de los recursos usados, que se implementarán para el desarrollo del programa de vigilancia radiológica individual y se plantea la metodología de calibración del equipo.

En el Capítulo 4 se muestran los resultados y las diferentes consideraciones adicionales obtenidas del seguimiento a los trabajadores que manipularon o estuvieron sometidos a ¹³¹I en estado volátil.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones del análisis y/o pertinencia del programa de vigilancia radiológica.

2. Diseño del programa de vigilancia radiológica empleado en la instalación

Uno de los propósitos de la protección radiológica individual es reducir los posibles riesgos que se pueden presentar por el manejo de fuentes radiactivas en el sitio de trabajo, procurando la evaluación de las condiciones del lugar y de las exposiciones individuales como lo establece el OIEA en la referencia [8], en este caso en particular que se tiene debido al riesgo radiológico existente con la manipulación de ^{131}I ; por tal motivo se hace necesario llevar un consolidado con base en los registros de las posibles estimaciones de incorporaciones, evaluando su exposición ocupacional (contaminación interna), para lo cual se debe sistematizar institucionalmente tanto las mediciones como los registros de datos de cada uno de los trabajadores que posiblemente sufran incorporaciones de este tipo por el manejo del radionucleido en su ámbito laboral de acuerdo a el Doctor Anselmo Puerta en la referencia [35].

De la misma manera se debe tener en cuenta la pertinencia o no del diseño de un programa de vigilancia radiológica rutinario, con tal fin se debe examinar detalladamente dentro de la práctica de la radiofarmacia, si necesariamente se debe llevar a cabo un programa de vigilancia radiológica individual, así como el seguimiento a las labores que son desempeñadas por las personas en directa manipulación de ^{131}I en la radiofarmacia del INC E.S.E, teniendo en cuenta la naturaleza, frecuencia y la precisión de acuerdo a la magnitud o a las posibles fluctuaciones de los niveles de exposición, así como a la probabilidad y magnitud de los riesgos potenciales según lo menciona el Doctor Puerta [35]; por esta razón debe hacerse una caracterización del lugar de trabajo, así como el establecimiento de un rango determinado en el método de medición empleado que pueda garantizar una Actividad mínima detectable (AMD) capaz de medir una incorporación que pueda significar a futuro una dosis efectiva al trabajador como se mencionó en la publicación del Congreso Latinoamericano de Protección Radiológica [?].

Dentro de la práctica habitual de la radiofarmacia en el INC E.S.E, existe una clasificación de zonas. Las zonas donde se realizan labores de manipulación de yodo radioactivo aparecen demarcadas en la figura 2-1 con color rojo. Dentro de estas zonas existe la posibilidad de que exista un riesgo potencial de incorporación por la manipulación de ^{131}I en estado líquido, ya que se ha manipulado el embalaje en el que venia contenido 2-2; adicionalmente el blindaje que contiene el vial también se ha retirado, para evitar que cuando ingrese a la cabina se produzca contaminación biológica en la misma; la retirada del blindaje precipita que el vapor contenido en el mismo y que ha logrado salir del vial que contiene el ^{131}I en estado líquido pueda escapar y ocupar el área de

manipulación en donde se encuentra el trabajador.

Por parte de la coordinación de la radiofarmacia del INC E.S.E, las personas encargadas del manejo del yodo radioactivo semanalmente son máximo 3, estas a su vez rotan las labores relacionadas concernientes a los procesos de: desembalaje, acondicionamiento del material radioactivo, dosificación de la actividad, preparación farmacéutica para el paciente y limpieza de las zonas.

Otra consideración es que si bien el INC E.S.E cuenta con un sistema de aires (campana de extracción) separados para la cabina de yodo mostrada en la figura 2-3 no se tiene sistema de monitoreo de aires personal donde pueda cuantificarse la cantidad de material radioactivo representativa en la concentración de aire que el trabajador inhala durante la manipulación del material radioactivo y que puede escapar de la cabina.

De acuerdo a el OIEA en la referencia [8] la necesidad de realizar el programa debe estar también sustentada en las actividades que son manipuladas anualmente en la radiofarmacia, así como la forma físico-química de manipulación en los diferentes procesos, el tipo de contención o blindaje con el que se hacen las preparaciones radiofarmaceuticas y la radiotoxicidad del radionúclido que tiene probabilidad de volatilización; los valores concernientes a la practica para este caso en específico de la radiofarmacia del INC se muestran en la tabla 2-1:

Tabla 2-1: Parámetros de manipulación en el proceso de ^{131}I

Parámetros	Valores INC
Actividad anual manejada (GBq)	532.8
Forma físico-Química	Solución líquida vial
Blindaje empleado (plomo)	Envoltura cilíndrica 3 cm de grosor
Radiotoxicidad ^{131}I	Grupo 3. De acuerdo a Delacroix y cols. [31]

2.0.1. Responsable de las mediciones

La planificación, dirección y aplicación de un programa de vigilancia radiológica se encuentra a cargo del profesional especializado (Físico Médico de Medicina Nuclear o el Oficial de Protección Radiológica), para este estudio se contará con el apoyo institucional de alguno de estos dos profesionales; la toma de datos estará a cargo del profesional responsable de la protección radiológica en la radiofarmacia. También vale la pena mencionar como en posibles casos de emergencia o casos en los cuales se pueda presentar contaminación interna del personal, el área de Salud y Seguridad en el trabajo y el Comité de Protección Radiológica examinarán e informarán los respectivos casos, así como las acciones a tomar (correctivas o preventivas) en caso de que esto sucediese, basados en los resultados de las medidas así como las respectivas estimaciones de dosis incorporada en el trabajador.



Figura 2-2: Bulto externo y blindaje Vial ^{131}I



Figura 2-3: Cabina y área dedicada a la manipulación de ^{131}I

2.1. Evaluación de las dosis individuales de los trabajadores de la radiofarmacia.

Por medio del programa de vigilancia radiológica individual se quiere proteger a los trabajadores expuestos de futuras consecuencias que la radiación ionizante pueda traer sobre su organismo. La principal herramienta con la que se cuenta en la actualidad para comprobar una limitación y evaluación en las dosis internas por contaminación de radionúclidos, así como para demostrar que no se está incurriendo en riesgos inaceptables y se cumplen los requisitos legales, se le conoce como Dosimetría interna al trabajador, esta definición fue tomada del curso español del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) [5].

El principal objetivo de la Dosimetría interna al trabajador como lo explica la referencia anteriormente mencionada [5] es “*la estimación de la dosis efectiva resultante de la incorporación al organismo de sustancias radiactivas*”. De esta manera los datos que se obtengan experimentalmente mediante esta herramienta son medidas de actividad retenida o excretada por el organismo de la persona sobre la cual se está haciendo el seguimiento.

Vale la pena aclarar que existen diferentes métodos para la evaluación de las posibles incorporaciones sufridas por el trabajador (Dosimetría interna), tales como: la medida de la actividad en cuerpo entero, la medida de la actividad de los órganos donde según el modelo biocinético pueda existir una dosis efectiva comprometida, si se tienen los coeficientes de dosis dependientes de cada órgano; a estas medidas se les denomina métodos directos de medición. Por otro lado existe el análisis de muestras biológicas tales como: el análisis de muestras fecales, saliva, sangre u orina; a el muestreo biológico se le denomina mediciones indirectas.

Si bien cuando se realizan medidas para la determinación de la dosis externa se hacen de manera directa, las medidas experimentales para la evaluación de la dosis interna pueden realizarse también de forma indirecta como se mencionó anteriormente.

Referente al empleo de un método de medición directa en el trabajador para estimar la dosis interna incorporada igualmente será necesario disponer de información adicional sobre:

1. Las circunstancias de la incorporación (momento estimado en que ésta se produce, radionucleido, forma química del contaminante, y el tamaño de partícula en el caso de inhalación de aerosoles radiactivos) de acuerdo a lo mencionado por el CIEMAT [5],
2. Comportamiento biocinético del radionucleido incorporado, para poder determinar la incorporación a órganos o tejidos específicos,
3. Presencia de ^{40}K en el organismo,
4. Estudios previos diagnósticos o terapéuticos con radiofármacos o medios de contraste, de acuerdo a lo estipulado por el OIEA [8],
5. Fumar o el consumo de bebidas alcohólicas, como lo menciona el OIEA en la publicación [8].

Otra manera de llevar a cabo un seguimiento personalizado para el caso de los elementos radiactivos que se presenten en forma volátil, es hacer el seguimiento a las zonas de trabajo donde se manipula por medio de la medida a los aires del área. Esto con la finalidad de conocer la posible concentración de actividad por unidad de área que el trabajador en determinado momento de la labor puede inhalar y posteriormente realizar una serie de aproximaciones al modelo respiratorio para hallar parcialmente la cantidad de actividad incorporada en el organismo según lo describe la publicación 130 del ICRP [30].

Las técnicas mencionadas anteriormente pueden bajo recomendación del Organismo [8] emplearse conjuntamente o por separado ya que no son excluyentes; para este caso en particular la escogencia de la técnica empleada para la medición de los trabajadores está dada únicamente por el equipamiento del centro, ya que no se tiene planificado por parte de el INC E.S.E realizar una inversión adicional a elementos que puedan representar costos adicionales como el muestreo biológico o el seguimiento a los aires para cada uno de los trabajadores que están presentes en la manipulación del ^{131}I , por ende se optará por el método de medición directa en tiroides de acuerdo al modelo biocinético evidenciado en la publicación 130 del ICRP [30].

2.1.1. Información biocinética del ^{131}I

Todas las formas comunes del yodo son fácilmente absorbidas por el cuerpo, en particular por la glándula tiroidea ya que esta tiene una gran afinidad por la incorporación de este elemento para la ejecución de diferentes procesos metabólicos de acuerdo a lo que explica el Doctor Rivero en su referencia [37], de acuerdo a lo presentado en las referencias principales del OIEA y del ICRP [8, 30], se asume que la incorporación de ^{131}I , es producida por una nube de vapor el cual posee partículas de diferentes tamaños ($1\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$), las cuales van a ser inhaladas e incorporadas rápidamente al sistema circulatorio como producto del intercambio gaseoso en el alvéolo pulmonar, considerando que es independiente a las diferentes regiones de depósito que recorre a lo largo del tracto respiratorio. Por recomendaciones evidenciadas en la literatura, se decide usar los parámetros de absorción por defecto ya que no se tiene ninguna información detallada de los componentes de la solución del vial empleada optando por valores de tipos F (rápido), para una partícula de $5\mu\text{m}$, como se encuentra referenciado en el artículo de Puerta. A [34].

Bajo el modelo biológico tomado del OIEA [8] se describe como para los adultos, *el 30% de yodo que llega a la sangre es captado por la glándula tiroidea; el otro 70% (aproximadamente) se excreta directamente por el sistema urinario*. De la misma manera asume que el período biológico en sangre es de *6 horas*; menciona también como de acuerdo al modelo biocinético, el yodo que se ha incorporado a las hormonas tiroideas abandona la glándula con un período biológico *de 80 días* y penetra en otros tejidos en los que se retiene con un período biológico *de 12 días*, posterior a esta evacuación sigue su ruta para ser excretado vía urinaria.

2.1.2. Vigilancia radiológica de las labores involucradas en la manipulación de ^{131}I

Al realizar una determinación de las condiciones existentes en la instalación del INC E.S.E y el potencial de exposición del trabajador para las labores que están involucradas con la manipulación de ^{131}I se evidenciaron las siguientes operaciones que pueden llevar a una incorporación de material radioactivo:

1. Alistamiento del bulto interno que contiene el vial con el blindaje, retirada del icopor y de el balde de aluminio.
2. Retirada del blindaje cilíndrico del vial y de los tornillos que unen las dos partes del mismo **2-2**.
3. Manipulación del yodo radioactivo en la cabina con guantes de acuerdo a la actividad con la que se realizará la capsula o dosificará la solución de yodo radioactivo.

Siendo las labores críticas las mencionadas en los numerales 2 y 3.

2.1.3. Vigilancia radiológica de las labores especiales en las que se encuentra involucrada la manipulación de ^{131}I

De la misma manera hay que tener en cuenta las potenciales exposiciones a las que el trabajador pueda estar expuesto y causar de esta manera una aumento en la dosis interna del personal, o bajo circunstancias normales de operación. A continuación se nombran algunas de estas situaciones:

1. Falla en el sistema de extracción de la campana de aire de la cabina (mecánica o eléctrica) empleada para la manipulación de yodo, provocando una re-circulación de material radioactivo dentro de la cabina que provocaría que los aires del área se contaminaran.
2. Fallo en el protocolo de manipulación del yodo radiactivo cuando este no sea dejado dentro de la cabina con las condiciones de temperatura y presión adecuadas provocando una sublimación del material radioactivo en el área donde se encuentre almacenado.
3. Mala manipulación del yodo radiactivo que de lugar a derrames mayores en lugares confinados fuera de la cabina.
4. Limpieza de la cabina, ya que en diferentes situaciones por motivo rutinario o descontaminación de la misma los materiales empleados en la limpieza de la zona (alcohol al 70 %, ver ficha técnica en referencia [24]), favorecen que los vapores resultado de la limpieza puedan contener material radioactivo en su proceso.

2.2. Método de medición

Una de las principales alternativas de medición se establece en las referencias del OIEA y del ICRP [8, 30], como la medición directa de la actividad incorporada de radionucleidos, esta recibe su nombre debido a que puede determinar la “medición directa de fotones gamma o de rayos x (incluida la radiación de frenado o bremsstrahlung emitidos por una deposición directa)”.

Dentro de las recomendaciones de la referencia del Organismo [8], también se menciona como “Las mediciones directas si es posible efectuarlas tienen una ventaja al proporcionar una estimación conveniente y rápida de una parte definida del cuerpo al momento de la medición si el equipo empleado es lo suficientemente sensible, las mediciones de órganos evaluados dependen menos de los modelos biocinéticos que los métodos indirectos (excretas), pero muestran grandes incertidumbres en su calibración”. Las mediciones directas también (al igual que las indirectas), deben encaminarse a evitar errores e incertidumbres; con tal fin se requirió movilizar el equipo empleado para la medición en la radiofarmacia, hasta un punto donde fuese posible garantizar un fondo bajo de radiación, la muda o el cambio de ropa de los trabajadores, así como la descontaminación de extremidades en caso de que se presentara, para poder hacer una medición dentro de parámetros mínimos de certeza sin que fuentes externas a el punto de medida pudiesen intervenir en la misma.

Una ventaja adicional del método directo de medición sobre las muestras de excreta es la evaluación de las incorporaciones después de un accidente, esto a causa del tiempo que transcurre entre la incorporación y la toma de la muestra; adicionalmente “ puede resultar difícil interpretar los componentes de la excreción urinaria temprana pues no está plenamente definidos en algunos de los modelos biocinético” tal como lo enuncia el OIEA [8]

Una desventaja clara mencionada por el OIEA [8] y principal inconveniente para la obtención de los datos con del método de medición directa es la interferencia con las labores que los trabajadores desempeñaban en la radiofarmacia, ya que requería primero que el equipo estuviera a plena disposición de la persona encargada de realizar las medidas por un intervalo de tiempo largo, para realizar la calibración y la toma de datos, como adicionalmente el tiempo de los trabajadores que tenían que relevarse si tenían labores dentro de la radiofarmacia para ser sometidos al procedimiento de monitoreo individual. Otra desventaja es que el equipo detector con el que contaba la radiofarmacia del INC E.S.E para realizar las mediciones directas, es que tenía una baja eficiencia midiendo las AMD para el ^{131}I , requiriendo de esta manera tiempos prolongados de conteo.

Teniendo en cuenta el método escogido de medición directa debe garantizarse que no se pierda ninguna incorporación por encima de los niveles determinados de acuerdo a la recomendación del OIEA en la referencia [8]; adicionalmente el equipo a emplearse debe tener la sensibilidad necesaria para alcanzar las actividades mínimas detectables (así los tiempos de conteo sean largos), para el establecimiento de las dosis incorporadas.

Ya que ningún método de medición bien sea por medición indirecta (excretas o análisis de sangre) o directa como el nombrado anteriormente da una plena certidumbre de la medida, debería optarse

por uno o más de estos para evitar la las sobre- estimaciones o sub-estimaciones en las dosis incorporadas y así aproximarse con mayor certeza a la medida de actividad incorporada.

2.2.1. Factor decisión

Las NBS de la OIEA [9] proponen un criterio matemático para conocer si existe la necesidad o no de implementar un monitoreo para los trabajadores que manipulan el ^{131}I , en el cual se valoran las condiciones de trabajo y manipulación del radionucleido; de esta manera la medida de protección empleada en la manipulación (f_{hs}), la forma físico-química que tenga el material radioactivo (f_{fs}), el factor de protección, que hace referencia a el equipo protector que se tenga en el laboratorio (f_{ps}), la actividad acumulada del radionucleido presente en el lugar en el transcurso del año (A_j) y el coeficiente de dosis para inhalación $e(g)$ hacen parte de los valores para determinar si es necesario implementar o no un programa de dicha categoría bajo recomendación del organismo en su referencia [8].

$$d_j = \frac{A_j f_{fs} f_{hs} f_{ps} e(g)}{0,001} \quad (2-1)$$

Si el valor dado por el factor decisión en la ecuación 2-1, es mayor a 1mSv se considera que los trabajadores pueden sufrir incorporaciones mayores a las del nivel del público y por tal razón debe llevarse a cabo un sistema de vigilancia radiológica individual. Para el caso específico de las instalaciones de radiofarmacia en el INC E.S.E los valores reemplazados en la ecuación son:

El valor de $f_{hs} = 10$, valor asignado para operaciones en seco de acuerdo al cuadro IV (Factores de seguridad en la manipulación) tomado de la referencia del organismo [8], operaciones de manejo en caja de guantes $f_{ps} = 0.01$, (cuadro V factores de seguridad en la protección), un factor de forma físico-química $f_{fs} = 0.01$ asignado para la forma líquida de manejo para el vial de ^{131}I . El valor de $e(g)$ correspondiente a la forma de incorporación de radionúclidos se obtiene de acuerdo a las siguientes rutas de manipulación: Inhalación de partículas radiactivas que están suspendidas en el aire. Para este caso el valor por inhalación de ^{131}I es tomado de las normas básicas de seguridad [9], como $e(g) = 1.1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}}$, el cual tiene como restricciones:

- Tipo de partícula: (F) rápido, 100 % absorbido con un periodo biológico de 10 minutos. Tomado de la referencia de la guía de seguridad del organismo [8] (cuadro I, Tipos de absorción);
- Tipo de Absorción: (V); el material se incorpora para ser transferido completa e instantáneamente a los fluidos corporales.
- Las concentraciones derivadas en aire se calculan sobre la base de un límite de dosis efectiva de 20 mSv en un año, un tiempo de trabajo de 2000 horas por año y una tasa de respiración estándar de $1.2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, y se presentan para un diámetro aerodinámico de la mediana de

la actividad de 1 y 5 μm , de acuerdo a las restricciones presentadas por el organismo en la referencia [8].

La actividad anual registrada en la licencia de manejo de material radioactivo de la instalación (A_j) es de 14,4 Ci/año o 532.8 GBq/año.

Reemplazando estos valores en la ecuación 2-1 resultaría:

$$d_j = \frac{(532.8 \text{ GBq/año})(0,01)(10)(0,01)(1.1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}})}{0,001} \quad (2-2)$$

El resultado del factor decisión con los valores indicados para la ecuación 2-1 será de $d_j = 5860$ Sv/año, lo cual implica que se debe llevar a cabo un programa de vigilancia radiológica individual, este valor se encuentra publicado en el artículo de Congreso Latinoamericano de Protección Radiológica del año 2015 [39].

Debe también tenerse en cuenta que en la radiofarmacia del INC E.S.E el riesgo existente para la incorporación por vía aérea de otros tipos de radionucleidos con una vida media mayor a 8 días es casi inexistente, por tal razón el factor decisión solo está calculado para el caso del ^{131}I y no para otros tipos de radionucleidos en el puesto de trabajo.

2.2.2. Establecimiento de los niveles de las dosis incorporadas [39]

Para el esclarecimiento de los niveles de dosis incorporadas en la radiofarmacia del INC se tomaron los valores más conservadores presentados en el artículo [36], encontrados para la práctica como se especificará en cada una de las ecuaciones y términos que se mencionarán a continuación.

1. Nivel de registro: el OIEA define el nivel de registro en su Guía de Seguridad [8] “*como el nivel de dosis, exposición o incorporación especificado por la autoridad reguladora en o sobre cuyos valores de dosis, exposición o incorporación recibidos por los trabajadores serán ingresados a los registros de exposición individual*”. Teniendo en cuenta la publicación del OIEA es sugerible tomar el nivel de registro para que corresponda a una dosis efectiva comprometida de 1 mSv, como también se especifica en el documento de Castellani [29]. Otra recomendación se evidencia en la publicación del ICRP [30], la cual sugiere que el valor mínimo detectable esté relacionado directamente con el *menor límite verdadero medible de dosis*, de acuerdo a esto y dadas las condiciones de medición en el INC E.S.E, así como las restricciones existentes en los métodos de medición directos que se implementaron para obtener los resultados de las actividades incorporadas; se propone que si se está tratando con trabajadores ocupacionalmente expuestos como lo son en el caso del área de radiofarmacia,

este nivel de registro sea 1/10 del límite de dosis para personal expuesto es decir 2 mSv. De tal forma que para N periodos de medición en el año, el nivel de registro por incorporación de un radionucleido j en un periodo de monitoreo debería estar dado por 2-3 :

$$N_R = \frac{0,002}{N \cdot e_j(g)} \quad (2-3)$$

Reemplazando la ecuación anterior se tiene que:

$$N_R = \frac{0,002}{52 \cdot (1.1 \cdot 10^{-8} \frac{Sv}{Bq})} = 3496 Bq \quad (2-4)$$

En el caso de ^{131}I por inhalación, con el respectivo valor del coeficiente de dosis efectiva para un periodo de evaluación de $N= 52$ semanas se tendrá un nivel de registro de **3496 Bq**.

2. Nivel de investigación: el OIEA define el nivel de investigación en la referencia [8] como *el valor de una magnitud tal como la dosis efectiva, la incorporación o la contaminación por unidad de área o volumen que al alcanzarse debería realizarse una investigación de las condiciones de operación del material radiactivo*. Es escogido sobre la base de una dosis efectiva comprometida de 5 mSv:

$$N_I = \frac{0,005}{N \cdot e_j(g)} \quad (2-5)$$

$$N_I = \frac{0,005}{52 \cdot (1.1 \cdot 10^{-8} \frac{Sv}{Bq})} = 8741 Bq \quad (2-6)$$

En el caso de ^{131}I por inhalación con su respectivo valor del coeficiente de dosis efectiva, para un periodo de evaluación de 52 semanas se tendrá un nivel de investigación de **8741 Bq**.

3. Niveles derivados:

Niveles derivados de registro (NDR): como lo explica la referencia del OIEA [8], *Son los resultados de las medidas que implican incorporaciones de radionúclidos o dosis efectivas comprometidas en los correspondientes niveles registro que se consolidarán en el historial dosimétrico del trabajador están dados por la ecuación:*

$$NDR = N_R \times m(t_o) = \frac{0,002}{N \cdot e_j(g)} \times m(t_o) \quad (2-7)$$

Donde $m(t_0)$, representa la fracción de una incorporación que queda en el cuerpo para ser medida en forma directa o indirecta, esta depende a su vez del periodo de desintegración físi-

ca y de la biocinética del radionucleidos en función del tiempo transcurrido. La información de estos valores se encuentra en el anexo III de las NBS [9]. Al ser m función de (t_0) , (t_0) por su parte, se encuentra definido como el tiempo estimado en el que pudo haber ocurrido la incorporación. Se calcula como $t_0 = \frac{365}{2N}$, siendo N el número de periodos de medición en el año, de esta manera, para un periodo de evaluación de 52 semanas se obtiene un tiempo aproximado (t_0) a 4 días.

Teniendo en cuenta este resultado de los valores de 4 días para la tabla $m(t_0)$ para una inhalación de partículas con tamaño de $5\mu m$ de ^{131}I en tiroides tendría un valor de $m(4) = 9.9 \cdot 10^{-2}$. Remplazando estos valores en la ecuación 2-7

$$NDR = N_R \times m(t_0) = \frac{0,002}{52 \cdot (1.1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}})} \times (9.9 \cdot 10^{-2}) = 346 \text{ Bq} \quad (2-8)$$

Finalmente en el caso de ^{131}I se tendría un **$NDR = 346 \text{ Bq}$** que representaría el valor de la medida a partir de la cual se hace el registro respectivo de las medidas realizadas sobre el trabajador.

Niveles derivados de investigación. (NID) según la guía de seguridad del OIEA [8]: *Son los resultados de las medidas que implican incorporaciones de radionúclidos o dosis efectivas comprometidas en los correspondientes niveles de investigación sobre los cuales debe ejercerse una medida correctiva a las labores de manipulación de acuerdo a la ecuación:*

$$NDI = N_I \times m(t_0) = \frac{0,005}{N \cdot e_j(g)} \times m(t_0) \quad (2-9)$$

Reemplazando los valores en la anterior ecuación se obtiene:

$$NDI = N_I \times m(t_0) = \frac{0,005}{52 \cdot (1.1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}})} \times (9.9 \cdot 10^{-2}) = 865 \text{ Bq} \quad (2-10)$$

Donde es el tiempo estimado en el que pudo haber ocurrido la incorporación, se calcula como . Análogamente al caso mostrado en 2-9, en el caso de ^{131}I por inhalación, se tendría un **$NDI = 865 \text{ Bq}$** que representaría el valor de la medida del trabajador a partir de la cual se realiza una investigación de las labores realizadas.

2.2.3. Establecimiento de la frecuencia del programa de vigilancia de incorporación.

Para que se satisfaga la condición de la incertidumbre en el valor de la incorporación y debido al desconocimiento del tiempo de la misma, se recurre a las tablas de los valores $m(t)$, donde comparando los valores entre el día 1 y el día propuesto de intervalo no varíe en un factor mayor a

3. Así, observando la tabla del Anexo III de las NBS [9], se observa que la división entre el valor $m(1)$ y $m(9)$ no supera dicho factor.

Comparando lo anterior con respecto a lo afirmado por el ICRP 130 [30], que establece un factor máximo de 3 entre los valores de $m(t)$, puesto que la fracción de ^{131}I inhalado que se retiene en el tiroides, tiende a cambiar en dicho factor (3 días), se satisface la condición de incertidumbre si la medición se hace al 4 día posterior a la manipulación del material radioactivo, esto al carecer de una mejor evidencia del tiempo en que se produjeron las posibles incorporaciones, con la finalidad que no dejen de tenerse en cuenta las incorporaciones correspondientes a más del 5 % del límite de dosis anual, tal como lo menciona también el OIEA en su guía de seguridad [8].

Dentro del calendario laboral de la radiofarmacia y los días establecidos para la manipulación, se acuerda que si la manipulación, es realizada rutinariamente los días martes en la mañana, la medición de los trabajadores se efectuará el día viernes en horas de la mañana. De otra manera si la manipulación es realizada otro día de la semana se optará porque no pasen más de 4 días posteriores a la manipulación para realizarse la medida sobre el trabajador.

3. Metodología de medición empleada en el programa de vigilancia radiológica individual

3.1. Consideraciones iniciales en la calibración del equipo

Al ser el ^{131}I un isótopo radiactivo de corta duración (periodo de semidesintegración de 8,0233 días) con emisión de partículas β (energía promedio para para la emisión principal 0.19 MeV), radiación γ (emisión principal de 0.364 MeV), datos tomados de la referencia de la guía de seguridad del OIEA [8] y teniendo en cuenta que en Colombia no existe actualmente un laboratorio primario de calibración para muestras patrón, logísticamente no es viable obtener una muestra calibrada de ^{131}I con niveles razonables de actividad para emplearlos en el ajuste del equipo que realizará la medición directa; por tal razón se emplea el ^{133}Ba como sustituto de larga duración debido a su larga vida media (10.539 años¹) y el hecho de que la segunda emisividad más abundante de radiación γ del ^{133}Ba tiene un valor de 0.356 MeV, que resulta ser similar en energía y probabilidad al más abundante en la desintegración del ^{131}I .

Considerando lo anterior y aprovechando la tenencia de una fuente de ^{133}Ba en el servicio de radiofarmacia del INC E.S.E, se pretende implementar dentro del programa de vigilancia radiológica individual una metodología de calibración del equipo que permita conocer la eficiencia de conteo del equipo para una actividad desconocida de ^{131}I por medio de la fuente patrón de ^{133}Ba , tal como el ejemplo caracterizado por el autor Prekegesen la referencia [22], a este proceso se le conoce como calibración cruzada.

Teniendo en cuenta el método seleccionado (método directo de medición) y su principal utilidad en el caso de los radionucleidos emisores de fotones con energía o cantidad suficiente para escapar del cuerpo y ser medidos por un detector externo, el detector comúnmente usado para la medición de captación tiroidea de ^{131}I , tal como se referencia en el documento de incorporación en trabajadores del organismo de Genicot. J y colaboradores, así como Puerta A. [8, 32, 36] corresponde a un detector de NaI(Ta). Los centelleos producidos por el cristal de NaI(Ta) con fotones de alta energía se

¹<http://www.nucleide.org/>

detectan; luego tubos fotomultiplicadores amplían la señal, generando impulsos electrónicos que se procesan para producir un espectro que se puede visualizar en una pantalla de un computador; dicho espectro refleja la de la radiación absorbida por el cristal, indistinto de la clase de radionucleido que se este cuantificando. Por tal motivo en la manipulación de los datos de la calibración cruzada se debe realizar una selección de las regiones de interés (RDI) que son medidas dentro de los espectros de ^{133}Ba y ^{131}I para obtener una eficiencia similar; de manera análoga se procede a la evaluación de la mínima actividad detectable que es inversamente proporcional a dicha eficiencia y que debe ser adecuada para satisfacer la cantidad de actividad descrita en nivel de registro (ver ec. 2-7).

El uso de cristales inorgánicos con elevado número atómico, permite detectar fotones energéticos (por encima de los 0.1 MeV) en este tipo de detectores de una manera eficiente. Dicho conteo también resulta ser efectivo en la medición directa, cuando se realiza directamente sobre la glándula tiroides ya que depende menos de los modelos biocinéticos que las mediciones indirectas, pero adicionalmente genera grandes incertidumbres en su calibración, debido a múltiples factores que intervienen en el ajuste del equipo como los problemas existentes de retrodispersión, radiación natural de fondo o fuentes de radiación representativas colindantes a la zona de medición.

3.2. Descripción de los recursos usados

Para realizar cuantificación de incorporación de actividad de ^{131}I , El INC E.S.E. cuenta con un equipo “Gamma-Sonda” Captus® 3000, del fabricante Capintec Inc., la cual cuenta con las especificaciones técnicas presentadas en la Tabla 3-1

Tabla 3-1: Especificación técnica del equipo usado para cuantificación de incorporaciones de actividad de ^{131}I

Serial	900604
Detector	NaI (Tl)
Tamaño detector	5.1 x 5.1 cm
Resolución	8% o mejor para ^{137}Cs
Colimador	cumple con estándar ANSI N44.3-1973
Canales de la interfaz	1024 canales
Máxima tasa de conteo	100000 cps

Adicionalmente la radiofarmacia cuenta con fuentes tipo lápiz como las mostradas en la figura 3-1 de ^{137}Cs y ^{152}Eu con el fin de realizar la calibración del detector en energía, linealidad y constancia del detector. También se cuenta con una fuente de ^{133}Ba tipo gotero ver figura: 3-2 de actividad inicial 244 μCi al 01/04/2007 para realizar la calibración cruzada de ^{131}I .



Figura 3-1: Fuentes Tipo lápiz para la calibración de la sonda Captus¹³¹I



Figura 3-2: Fuentes tipo gotero para la calibración de la sonda Captus¹³¹I

Para la calibración acorde a una geometría que asemeje la glándula tiroidea, se cuenta con un maniquí de captación tiroidea Marca BIODEX el cual es propuesto por el Organismo Internacional de Energía Atómica **3-3**; El maniquí cilíndrico cuenta con unas dimensiones de 12.7 cm de base por 12.7 cm y altura, así como diámetro interno de 10 cm por 5 cm. El maniquí usado debe estar ubicado aproximadamente en la misma posición en la que se va a colocar al trabajador para la medición buscando reproducir de la mejor manera posible la distribución del radionucleido localizado en el trabajador de acuerdo a lo recomendado por el OIEA en la referencia [8]

3.3. Consideraciones para la medición del trabajador

Algunas consideraciones tomadas de las recomendaciones dadas en la referencia de incorporaciones al trabajador por el OIEA [8] deben ser tenidas en cuenta para disminuir la incertidumbre de la medida y lograr una estimación adecuada en la incorporación medida en el trabajador, estas son:

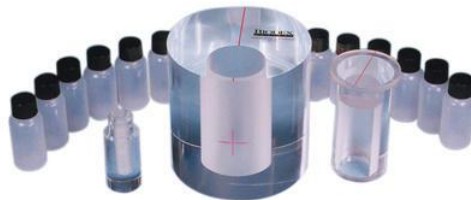


Figura 3-3: Maniquí para calibración de sonda del equipo Captus 3000^{131I}

- Disponer de instalaciones blindadas, alejadas de fuentes de radiación artificial manipuladas en la radiofarmacia o en la calibración del equipo.
- Retirar la ropa de trabajo o hacerse recambio de la misma, se deben retirar de gafas, joyas o maquillaje.
- Debe realizarse un monitoreo previo de contaminación superficial en extremidades, para evitar fuentes de contaminación superficial externa en el trabajador contribuyan en la tasa de conteo del equipo.
- Se debe tener conocimiento de la distribución espacial del radionucleido a medirse que se concentra temporalmente en un tejido u órgano (en este caso glándula tiroides).

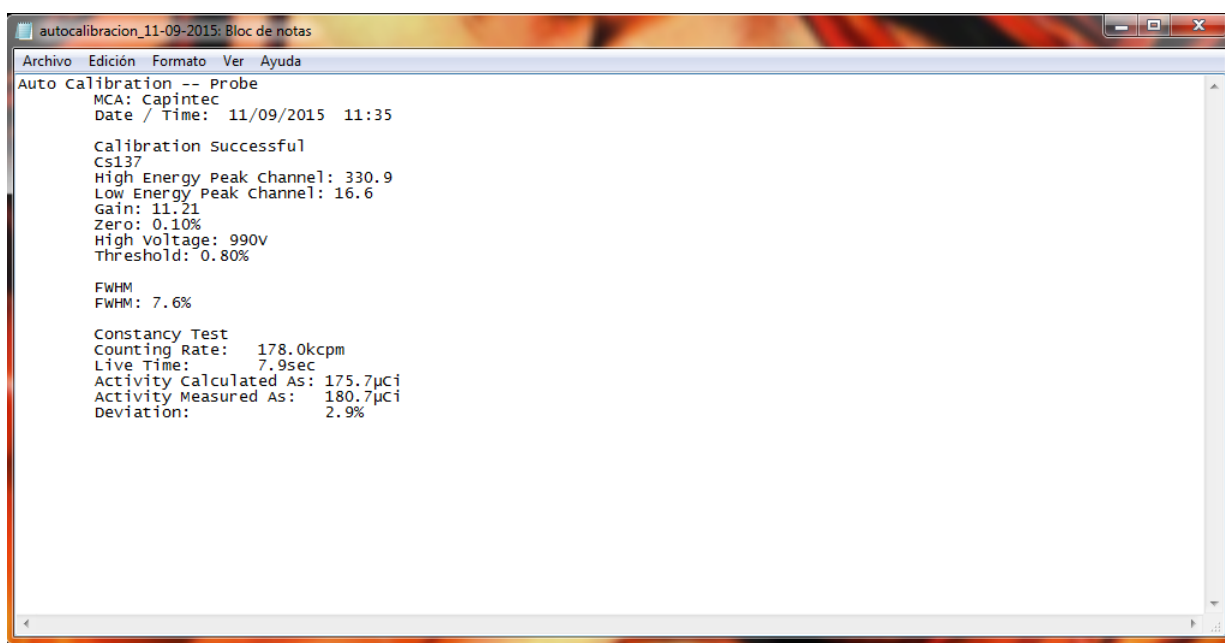
3.3.1. Revisión de los parámetros del detector tipo sonda

En el anexo del presente trabajo final de maestría 6 se describen los pasos para realizar la calibración y control de calidad de el pozo y la sonda del equipo Captus 3000; a continuación se mencionan brevemente las pautas para la calibración de la sonda:

- Calibración en energía: Se emplea una fuente de ¹³⁷Cs, puesto que existe una relación entre la energía y la señal producida por el detector, haciéndose posible en determinados casos obtener la función que relaciona los números de canal con las energías que se les atribuyen. Esta prueba contiene los datos del pico de alta y baja energía en su respectivo canal del ¹³⁷Cs, así como la ganancia, el umbral (threshold) y el ancho a la mitad de la altura máxima o por sus siglas en inglés (FWHM); esta última deberá ser menor a 8 %, aunque usualmente el valor puede incrementarse hasta un 11 % dependiendo del tiempo de vida del detector, como lo menciona el CIEMAT en su referencia [6],
- Linealidad: pretende discriminar entre sucesos de energías distintas, el objetivo de esta prueba es verificar que la respuesta del equipo es lineal y es ajustada a 2 keV/canal, en esta prueba se emplea una fuente de ¹⁵²Eu.

- Prueba de eficiencia de detección o constancia: compara la actividad medida con la actividad calculada por decaimiento, de una fuente cuya discrepancia debe ser de $\pm 10\%$, de acuerdo a lo estipulado en el artículo de Arciniegas. M [26], en esta prueba vuelve a emplearse la fuente de ^{137}Cs mencionada en la sección 3.2, esta prueba usa el número total de cuentas dentro de la región de interés de la energía de 662 keV y la eficiencia para calcular la actividad de la fuente y compararla con la actividad de referencia.

Como paso final los resultados mostrados al final del proceso de calibración de la sonda debe guardarse los datos en un archivo tipo .txt, tal como se muestra en la figura 3-4, donde pueda verificarse que efectivamente la calibración fue realizada satisfactoriamente a la fecha y hora correspondiente.



```
autocalibracion_11-09-2015: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Auto Calibration -- Probe
MCA: Capintec
Date / Time: 11/09/2015 11:35

Calibration Successful
Cs137
High Energy Peak Channel: 330.9
Low Energy Peak Channel: 16.6
Gain: 11.21
Zero: 0.10%
High Voltage: 990v
Threshold: 0.80%

FWHM
FWHM: 7.6%

Constancy Test
Counting Rate: 178.0kcpm
Live Time: 7.9sec
Activity Calculated As: 175.7µci
Activity Measured As: 180.7µci
Deviation: 2.9%
```

Figura 3-4: Ejemplo de archivo que muestra los resultados de la calibración ^{131}I

3.3.2. Medición del fondo radiactivo

Dada la recomendación del recuento de fondo en el sistema detector usando un maniquí apropiado por parte del OIEA [8], de acuerdo a la geometría empleada en la medición del trabajador, tal y como lo describe el anexo: Instructivo para la calibración del equipo CAPTUS 3000 ver anexo:6, debe tenerse en cuenta que la RDI seleccionada debe estar en el rango de 242 keV a 435 keV; dentro esta RDI se encuentran 4 picos de energía del ^{133}Ba , el de 276 keV con una emisividad de 0.0716; el de 302.8 keV con una emisividad de 0.1834; el de 356 keV con una emisividad de 0.6205 y la de 383.8 keV con una emisividad de 0.0894 de acuerdo a la metodología dada por el Doctor Puerta en su publicación [36]. Los canales seleccionados en la opción multicanal del

detector son respectivamente: ROI 1 (Canales 73-121), ROI 2 (Canales 121-218), ROI 3 (Canales 218-266),

La estimación del fondo se realizó con un tiempo de conteo de 2 minutos (120 segundos). Bajo la recomendación del OIEA [8], las mediciones de fondo en el contador deberían efectuarse lo más cerca posible, en tiempo, a la medición de radiactividad del sujeto, pero debido a las limitaciones en el tiempo de manejo del equipo se opta por una normalización del tiempo medido del fondo con respecto al tiempo de conteo del trabajador, como se evidencia en la fracción de los tiempos definida en la ecuación 3-1.

Vale la pena recordar las recomendaciones dadas en 3.3, para evitar contribuciones adicionales al fondo radioactivo del área donde se realizará la medición del trabajador.

3.4. Medición de la eficiencia de ^{131}I con ^{133}Ba para la geometría en dosimetría interna

Como primer paso, se debe tener en cuenta la resta del fondo radioactivo así como la normalización de los tiempos de conteo en las RDI de esta manera:

$$C_{RDI_{i-net}} = C_{RDI_i} - C_{F-RDI_i} \cdot \left(\frac{t_{F-RDI_i}}{t_{RDI_i}} \right) \quad (3-1)$$

donde C_{RDI_i} representa las cuentas medidas en las RDI seleccionadas para el trabajador, C_{F-RDI_i} son las cuentas en las RDI para el fondo radioactivo, t_{F-RDI_i} es el tiempo de conteo del trabajador y t_{RDI_i} es el tiempo de conteo de fondo.

La ecuación 3-1 debe aplicarse respectivamente para cada uno de las RDI seleccionadas para el ^{133}Ba nombrados en la subsección 3.3.2.

Con respecto a la selección de las RDI mencionada anteriormente, y con el fin de considerar la corrección por contribución de retrodispersión en el espectro, se aplica el método de las tres ventanas propuesto por Siegel y Cols en la publicación conocida como MIRD 16 [38], el cual pretende realizar la corrección a la región de interés considerada. Para ello se escogen dos ventanas, una inferior y una superior a la RDI de un ancho en energía equivalente a la mitad del de la RDI 3-5. En este caso, la ventana inferior tendría un intervalo de 96 keV por debajo de los 242 keV y de 96 keV por encima de los 435 keV. Estas ventanas deben ser configuradas en la herramienta de análisis de multicanal o por sus siglas en inglés (MCA) en el programa de la gammasonda Captus ®3000.

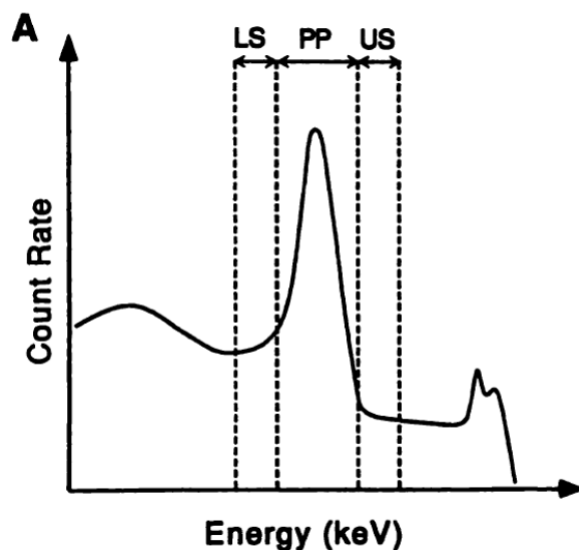


Figura 3-5: Esquema para corrección de cuentas usando método de las tres ventanas, LS: lado inferior, US; lado superior, PP: Pico principal. Figura extraída de [38]

La corrección por retrodispersión se realiza para la ROI principal como se indica en la ecuación:

$$C_T = C_{pp} - C_{Ls} - C_{us} \quad (3-2)$$

Donde C_T son las cuentas netas en la RDI, C_{Ls} representa las cuentas netas en la ventana inferior y C_{us} representa las cuentas netas en la ventana superior y C_{pp} las cuentas del pico principal de ^{133}Ba , halladas respectivamente para cada pico de acuerdo a la ecuación 3-1.

El cálculo la eficiencia de la sonda de NaI(Tl) considerando las emisiones en los picos de energía del ^{133}Ba se puede evidenciar en 6; de esta manera el procedimiento para el cálculo viene dado por la ecuación explicada en la referencia de Prekeges [22] 3-3.

$$E_{^{133}\text{Ba}} = \frac{C_T}{T(\text{s}) \cdot A(\text{Bq}) \cdot \sum Y_{^{133}\text{Ba}}} \quad (3-3)$$

donde T es el tiempo de conteo, A la actividad de la fuente de ^{133}Ba al día de la calibración, $\sum Y_{^{133}\text{Ba}}$ es la suma de la proporción de emisiones dentro de los picos considerados en la RDI y C_T son las cuentas netas dentro de la RDI definida para los picos de energía del ^{133}Ba considerados, en el caso de la RDI de 242 a 435 keV se tiene que $\sum Y_{^{133}\text{Ba}} = 0.9649$ de acuerdo a lo empleado en el artículo del Doctor Puerta [35],

Se define que la eficiencia equivalente de ^{131}I aquella en la cual la tasa de conteo en la RDI es

igual para ambos radionucleidos (^{131}I y ^{133}Ba), siendo $\sum Y_{131I} = 0.816$ de modo que se cumple la expresión presentada en la ecuación 3-4, de acuerdo a lo explicado por Puerta. A en su artículo [35].

$$E_{eq^{131I}} = E_{133Ba} \frac{\sum Y_{131I}}{\sum Y_{133Ba}} \quad (3-4)$$

La $E_{eq^{131I}}$ es un parámetro que permite determinar la actividad de ^{131}I en los casos de conteo, de forma tal que para una tasa de conteo determinada de ^{131}I la actividad de este se obtiene a través de la ecuación 3-5.

$$A_{T-^{131I}} = \frac{C_{T_{131I}}}{E_{eq^{131I}}} \quad (3-5)$$

Donde $C_{T_{131I}}$, es el conteo neto del trabajador.

De esta manera se permite conocer la actividad para ^{131}I en la RDI descrita anteriormente, en la geometría de calibración recomendada para Dosimetría interna de los trabajadores, a partir de la calibración cruzada con un patrón de ^{133}Ba .

De acuerdo a las recomendaciones del Doctor Puerta. [36], desde que se tome la región de interés comprendida por los 4 fotopicos del ^{133}Ba aplicando cualquiera de los métodos allí enunciados Puerta y cols mostraron que la fuente puede ser un patrón trazable para las medidas de los trabajadores.

3.5. Valoración de la actividad mínima detectable (AMD) para dosimetría interna

En la selección de las RDI entre las energías de 242 a 435 keV se realiza la medición de la actividad mínima detectable para la sonda Captus 3000, de manera análoga a las RDI seleccionadas en la subsección 3.3.2. El valor de cuentas de fondo c_f y el tiempo de conteo T en segundos se emplean para calcular la AMD a través de la ecuación tomada de la publicación número 58 del ICRP [23] considerando la estadística de Currie para una eficiencia $E_{eq^{131I}}$ representada en la ecuación 3-5.

$$AMD = \frac{4.65\sqrt{c_f} + 2.71}{T \cdot E_{eq^{131I}}} \quad (3-6)$$

En el caso de estudio, la AMD para tiempos de conteo de 20 minutos fue en promedio ± 318 Bq como se puede evidenciar en la Tabla 4-2, de la sección resultados. Este valor y tiempo de conteo se escogió ya que debido a la naturaleza del fondo radiactivo como se comentará en la sección 4.1, puede variar de acuerdo a las condiciones del área seleccionada para las mediciones. Este rango de valores escogidos para el conteo de la AMD esta acorde a la restricción del nivel derivado de registro ecuación 2-3 y del nivel derivado de investigación ecuación 2-9 siendo menor en los dos casos para que ninguna medida tomada pueda subestimarse o pasarse por alto sin quedar consolidada en el historial dosimétrico del trabajador.

3.6. Valoración de actividad incorporada con modelos estandarizados y evaluación de dosis efectiva comprometida

En el caso en que el valor de la actividad medida supere el NDR , se recurrirán a modelos estandarizados para calcular la incorporación de material radioactivo a través de la ecuación 3-7; para realizar un cálculo de la incorporación del órgano, se dividen los valores obtenidos de la Actividad medida por la fracción de la incorporación retenida en el cuerpo, de esta manera. Para hallar la dosis efectiva comprometida $E(50)$ se multiplicará el valor de I por el coeficiente de dosis efectiva para ^{131}I inhalado siendo $e(g) = 1.1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}}$.

$$I(\text{Bq}) = \frac{A}{m(t)} \quad (3-7)$$

$$E(50) = I(\text{Bq}) \cdot e(g) \quad (3-8)$$

En el caso de que la medida supere el NDI se realizará el cálculo de una manera análoga al de la incorporación dentro de los NDR, pero debido a la magnitud de la medida se debería establecer un monitoreo los días siguientes al incidente con medidas directas.

De la misma manera debería complementarse las mediciones directas con mediciones indirectas en orina, para poder obtener un modelo metabólico individual con el que se pueda lograr una evaluación de la dosis adecuada. Teniendo en cuenta los objetivos planteados en la sección 1.3, se resaltarán los resultados de las mediciones directas que superen dicho NDI, pero el cálculo metabólico no hará parte de el análisis del presente trabajo.

3.7. Acciones a tener en cuenta en el registro de las medidas

Teniendo en cuenta las restricciones dadas por la actividad mínima detectable ecuación 3-6 y los niveles derivados ecuaciones 2-7 como 2-9, se debe tener en cuenta que tipo de acciones deben tomarse en los tres casos que pueden ocurrir, bien sea que la medida sea menor que el nivel de registro, que esta se encuentre entre el nivel de registro y el de investigación o en el caso de que llegara a superarse el nivel de investigación. En la Figura 3-6 se presenta en un esquema las acciones a seguir en cada una de estas tres situaciones con base en la medición de la actividad incorporada realizada al trabajador.

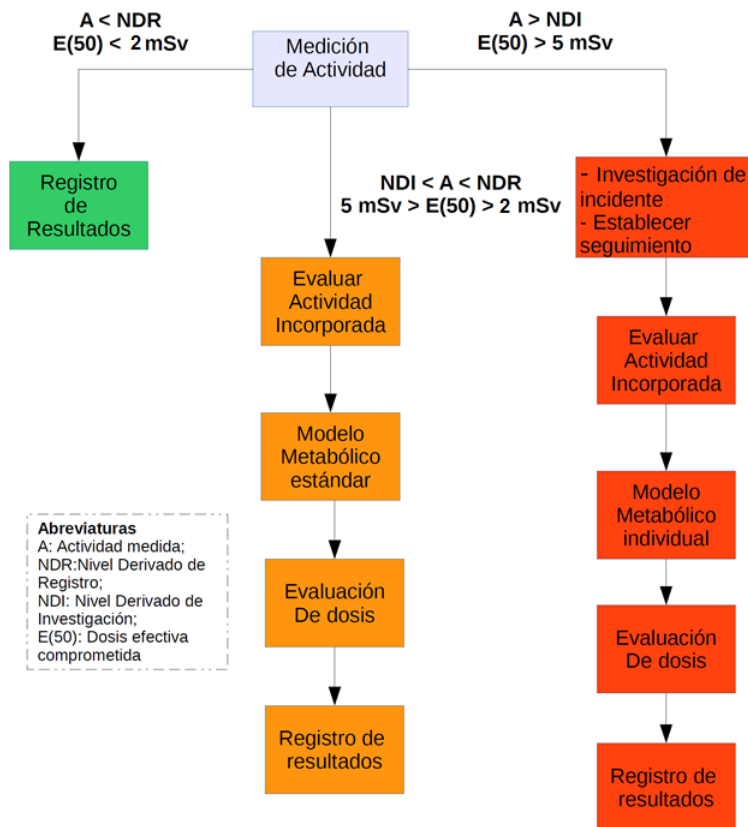


Figura 3-6: Acciones a tomarse de acuerdo a la medida obtenida en el trabajador

4. Resultados de las mediciones del programa de vigilancia radiológica individual

De acuerdo a la metodología anteriormente planteada, el programa se visualizó a lo largo de un año completo (52 semanas), pero debido a que en la radiofarmacia del INC E.S.E los procedimientos de manipulación con solución líquida concentrada en el vial de ^{131}I se presentaron en principio en forma intermitente y luego se dejaron de realizar de manera definitiva en las instalaciones, el periodo de monitorización no alcanzó las semanas estipuladas inicialmente; por tal razón a continuación se presentarán no solo los resultados obtenidos sino las consideraciones adicionales pertinentes para la adecuada interpretación de los mismos.

Otra consideración importante es que el programa de monitorización radiológica como lo indica la referencia del OIEA [8], debe realizarse cuando exista riesgo de incorporación por material radiactivo, es decir cuando se manipule material radiactivo; pero debido a la rotación de trabajadores, a los periodos sin manejo de material radiactivo por parte de la radiofarmacia, y a los periodos de vacaciones de los mismos, la cantidad de periodos monitoreados en las medidas de algunos de los trabajadores no son las suficientes como para llegar a un nivel derivado de registro relacionado con la AMD generalizado para la práctica, por tanto esta recomendación se ampliará en el capítulo 5.

4.1. Preparación del trabajador para la medida

Se pide al trabajador que antes de la salida del área de preparaciones de la radiofarmacia se realice la medida en pies y manos de contaminación superficial, para verificar que las extremidades no se encuentren contaminadas con las diferentes clases de radionucleidos manejados en el área caliente. Si existe una medida significativa en manos, debe aplicarse el protocolo de descontaminación, efectuando lavado de manos varias veces hasta que pueda tenerse un límite aceptable en la medición post-descontaminación, si la contaminación es fija en el área de las manos debe realizarse la observación respectiva con el valor obtenido en cuentas. En caso de que la contaminación se presente en los pies, debe cambiarse las polainas; si la medida sigue siendo significativa se hace recambio a otro calzado que no se encuentre contaminado.

Se pide que se retire o re-cambie la ropa con la que estaba laborando en el área de preparaciones de la radiofarmacia, de la misma manera que se retiren elementos tales como: joyas, gafas y maquillaje en caso de tenerse, de acuerdo a como se mencionó en la sección 3.3.

Ya que el equipo no puede trasladarse del piso en donde se encuentra ubicado, el procedimiento de medición de los trabajadores se realiza en una zona de la misma radiofarmacia donde el nivel de fondo sea aceptable o lo más bajo posible para poder tener una mínima actividad detectable inferior a el nivel de registro; con tal fin se desplazó el equipo a una zona colindante a la recepción de la radiofarmacia, donde la distancia y el blindaje de las posibles fuentes de radiación se consideraron adecuadas. Debe tenerse en cuenta que si bien la AMD medida en dicha zona como se mostrará en la tabla 4-2 muestra valores significativamente por debajo de el NDR, en algunas ocasiones cualquier variación de fondo dentro del área caliente de la radiofarmacia representaba una gran contribución al fondo del área donde se efectuaba la medición de la AMD, al tratarse de actividades tan pequeñas con una eficiencia de equipo limitada.

Una vez se garantiza que el trabajador no presenta contaminación superficial en ninguna de sus superficies corporales, se pide que se siente con la región de la horquilla esternal (cuello) expuesta, para colocar a 1cm de distancia aproximadamente la sonda, con el fin de realizar el conteo en tiroides. La geometría de medición con el trabajador se muestra en la figura 4-1

En algunos casos, cuando existía sospecha de aumento del fondo radioactivo en la zona, de acuerdo al resultado del espectro mostrado en la figura 4-2, antes de realizar el conteo al siguiente trabajador, se realizó otro conteo de fondo en los ROI con un tiempo de 120 segundos, para garantizar que las cuentas de fondo que serían descontadas al conteo neto del trabajador fueran acordes a el fondo radiactivo en la respectiva medición.



Figura 4-1: Geometría de medición trabajador de radiofarmacia

Como resultado para la medición con un tiempo de conteo de 20 minutos (1200 segundos), con las RDI mencionadas en el ajuste de la AMD sección 3.5, el software de la sonda Captus 3000® mostrará como resultado un espectro energético como el que se evidencia en la figura 4-2.

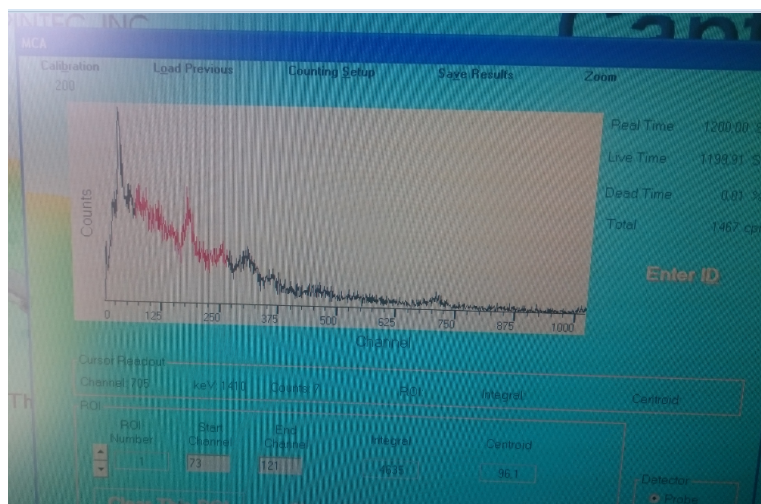


Figura 4-2: Ejemplo de espectro obtenido en la medición de TOE

4.2. Consolidación de los registros dosimétricos institucionales

Dentro del programa de vigilancia radiológica, debe existir una elaboración y mantenimiento de los registros de la dosis individual para los trabajadores expuestos a la radiación, dichos registros deberían *servir de apoyo para la toma de decisiones, demostrar y facilitar el cumplimiento de las normas, permitir la reconstrucción de los resultados en cualquier momento posterior y facilitar la coordinación con otros registros requeridos, tales como los que se utilizan para la vigilancia radiológica individual de la exposición externa y para el control radiológico de zonas. Por consiguiente, deberían ser fácilmente recuperables y estar protegidos para evitar su pérdida* [8], por tal razón se crearon tres registros especializados en los cuales se pueda corroborar tanto la información representativa de la calibración del equipo, las cuentas netas tomadas a cada uno de los trabajadores en las RDI correspondientes, el historial de exposiciones, un breve resumen de hábitos como beber o fumar y los exámenes a los que pudo ser sometido el trabajador en los que se emplea medios de contraste con bario o exámenes diagnósticos previos con radionucleidos, que podrían conllevar a producir mayor estimación en las actividades medidas en cada uno de los trabajadores debido a la sensibilidad del equipo, pero que no están ligadas a una exposición ocupacional.

Los datos correspondientes a la calibración inicial del equipo, al conteo de fondo en las RDI seleccionadas, los tiempos empleados para el conteo, el cálculo de las eficiencias de ^{133}Ba , de ^{131}I y el cálculo de la AMD, se encuentran en la primera página de un archivo tipo excel nombrado "Medidas de captación ^{131}I RF", contenido en la carpeta del Oficial de Protección Radiológica de la Radiofarmacia del INC.

Los datos relacionados con los conteos propios de cada trabajador, están relacionados dentro del archivo como pestañas nombradas AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA IN-

TERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA , estos formatos están comprendidos por dos páginas que se muestran en las figuras 4-3 y 4-4, donde se puede evidenciar las recomendaciones básicas para la plena identificación del trabajador y los datos empleados para el análisis de la actividad incorporada, como del resultado final de la dosis efectiva comprometida de cada trabajador.

REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA										CÓDIGO	AE-P04-F-64
										VERSION	1
										VIGENCIA	12/08/2015
Página 1 de 2											
1. Datos de trabajador											
Nombres	Apellidos	Fecha de nacimiento (DD/MM/AAAA)	Número de identificación	Fecha de ingreso al servicio	Edad	Género	TOE en otra institución	Fuma o bebe licor	Equipo de medición		
2. Mediciones calibración equipo y caracterización del fondo											
Fecha de calibración	Hora de calibración	Calibración sonda (Si/No)	Eficiencia del detector i-131 (%)	Cuentas fondo ROI 1	Cuentas fondo ROI 2	Cuentas fondo ROI 3	Tiempo de conteo (s)	Firma responsable de la medición			

Figura 4-3: Registro medidas de Dosimetría interna para trabajadores radiofarmacia pág 1

REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA										CÓDIGO	AOE-P04-F-64
										VERSION	1
										VIGENCIA	12/08/2015
Página 2 de 2											
2. Mediciones actividad incorporada											
Fecha de medición	Hora Medición	Cuentas ROI 1	Cuentas ROI 2	Cuentas ROI 3	Tiempo de conteo TOE (s)	Cuentas netas ROI 1	Cuentas netas ROI 2	Cuentas netas ROI 3	Actividad medida (Bq)	Firma trabajador	Firma responsable medición

Figura 4-4: Registro medidas de Dosimetría interna para trabajadores radiofarmacia pág 2

Fecha Calibración	Eficiencia ^{133}Ba	Eficiencia ^{131}I
9/02/2015	$1,06 \times 10^{-3}$	$8,98 \times 10^{-4}$
13/04/2015	$1,03 \times 10^{-3}$	$8,67 \times 10^{-4}$
11/09/2015	$9,55 \times 10^{-4}$	$8,07 \times 10^{-4}$
18/09/2015	$1,05 \times 10^{-3}$	$8,90 \times 10^{-4}$
25/09/2015	$1,05 \times 10^{-3}$	$8,92 \times 10^{-4}$
02/10/2015	$1,06 \times 10^{-3}$	$8,72 \times 10^{-4}$
16/10 /2015	$9,15 \times 10^{-4}$	$7,74 \times 10^{-4}$
19/10/2015	$1,09 \times 10^{-3}$	$9,18 \times 10^{-4}$
20/10/2015	$1,06 \times 10^{-3}$	$8,94 \times 10^{-4}$
30/10/2015	$1,03 \times 10^{-3}$	$8,75 \times 10^{-4}$
06/11/2015	$1,04 \times 10^{-3}$	$8,79 \times 10^{-4}$
19/11/2015	$9,59 \times 10^{-4}$	$8,11 \times 10^{-4}$
30/11/2015	$1,02 \times 10^{-3}$	$8,65 \times 10^{-4}$
14/12/2015	$1,08 \times 10^{-3}$	$9,12 \times 10^{-4}$
05/02/2016	$1,05 \times 10^{-3}$	$8,84 \times 10^{-4}$
08/02/2016	$1,13 \times 10^{-3}$	$9,72 \times 10^{-4}$

Tabla 4-1: Eficiencias medidas de ^{133}Ba y ^{131}I

4.3. Resultados eficiencias medidas e incertidumbres para el ^{133}Ba y ^{131}I

A continuación en la tabla 4-1 se muestran las eficiencias en las respectivas RDI seleccionadas en las fechas de calibración del equipo.

De acuerdo a la Tabla 4-1 se tiene que la desviación de las eficiencias para el ^{133}Ba y el ^{131}I esta dada por la desviación estándar calculada para los valores de la muestra por la ecuación 4-1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{X} - X_i)^2}{N_i - 1}} \quad (4-1)$$

Donde σ , es la desviación estándar de los valores de la eficiencia de ^{133}Ba o ^{131}I respectivamente, \bar{X} es la media para el grupo N_i de medidas X_i , basado en la ecuación del libro de experimentación del autor Baird [2]. El resultado de la desviación entre las 16 medidas tomadas en el ajuste para de las eficiencias calculadas de acuerdo a la ecuación 3-3 es de $\sigma_{E^{133}\text{Ba}} \simeq 4.89 \times 10^{-5}$, lo cual evidencia una estabilidad aceptable de la fuente a lo largo del monitoreo. De manera análoga, la desviación para la eficiencia calculada de ^{131}I , tuvo un resultado de $\sigma_{E^{131}\text{I}} \simeq 4.14 \times 10^{-5}$. Por otro lado para garantizar que los tiempos de conteo establecidos en la medición en los trabajadores, son adecuados y satisfacen la actividad determinada en el nivel de registro para que ninguna cantidad incorporada por debajo de dicho nivel sea despreciada, dichos valores de AMD deben ser comparados y ser menores a el valor del **NDR = 346 Bq**.

Fecha Calibración	AMD(Bq)
9/02/2015	314
13/04/2015	322
11/09/2015	313
18/09/2015	310
25/09/2015	312
02/10/2015	319
16/10 /2015	353
19/10/2015	307
20/10/2015	342
30/10/2015	309
06/11/2015	327
19/11/2015	350
30/11/2015	334
14/12/2015	301
05/02/2016	308
08/02/2016	282

Tabla 4-2: Actividades mínimas detectables en las fechas de calibración

Dadas las semanas de monitoreo mencionadas en la subsección 2.2.2, que son las mismas mencionadas por el Doctor Anselmo en su publicación [34], debe hacerse la claridad que si los periodos de monitoreo son mayores a los estipulados inicialmente la actividad mínima detectable también aumenta. De acuerdo a los valores obtenidos en las AMD puede evidenciarse que en las 16 medidas se tendrán valores mínimos cercanos a el valor del NDR calculado en el capítulo 2. Con lo cual se garantiza el nivel de confianza necesario para el reporte de las medidas adquiridas.

4.4. Evaluación de los periodos de monitoreo medidos

Teniendo en cuenta las aclaraciones presentadas al principio de este capítulo debe tenerse en cuenta que si bien el NDR fijado para 52 semanas de monitoreo esta relacionado con un valor de $m(t)$ de aproximadamente 4 días $m(4)$, si cambia el numero de periodos en el año en el cual se realizó el monitoreo, debe cambiarse de la misma manera el valor de $m(t)$, y por consiguiente la expresión $t_0 = \frac{365}{2N}$ que esta relacionada con el valor de $m(t)$ tendrá un valor diferente al estimado inicialmente 2.2.2. De tal manera, evidenciando los periodos en el año sobre los cuales se realizó el monitoreo tenemos un valor de $N = 8$, para el caso de la mitad de la población de trabajadores medida ver tabla 4-3.

TOE	Periodos de Monitoreo
1	8
2	8
3	7
4	3

Tabla 4-3: Periodos de monitoreo por trabajador

De acuerdo a esto, ya que los niveles derivados tanto de registro como de investigación, son dependientes de la función $m(t)$ y esta a su vez del número de periodos como se mencionó anteriormente, considerando ahora que el numero de periodos de monitoreo es menor al establecido inicialmente de 52 semanas, $N = 8$, se obtiene un nuevo valor $m(t)$, donde $m(t) \simeq m(20) = 2.2 \times 10^{-2}$, esta conclusión también puede ser encontrada en el artículo del Doctor Puerta [34] para partículas de $5 \mu\text{m}$ de ^{131}I . Aplicando directamente estos valores sobre las ecuaciones 2-7 y 2-9, mencionadas en el capítulo 2, los niveles derivados respectivamente serían de: $NDR_{8\text{semanas}} = 500\text{Bq}$ y $NDI_{8\text{semanas}} = 1250\text{Bq}$.

4.5. Calculo de Incertidumbres en las magnitudes involucradas en el resultado de la actividad medida al trabajador

La precisión de cualquier resultado a partir de datos experimentales debe estar ligada a la propagación de las incertidumbres de cada una de las variables. Para este caso el resultado de la actividad medida dependerá principalmente de las variaciones en el conteo de fondo, de la eficiencia calculada de ^{131}I y los conteos netos del trabajador, esto debido a que dentro de los conteos netos del trabajador se realiza directamente el cálculo con los conteos netos del trabajador en las respectivas RDI en la ecuación 4-2.

De acuerdo a esto la desviación de los datos obtenidos en la actividad medida para cada uno de los trabajadores vendrán dados por la ecuación presentada en el artículo de la EURACHEM [7]:

$$\sigma_{A_{mtoe}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{E_{eq}^{131}\text{I}}}{E_{i^{131}\text{I}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_{TOERDI1}}}{C_{TOERDI1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_{TOERDI2}}}{C_{TOERDI2}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_{TOERDI3}}}{C_{TOERDI3}}\right)^2} \quad (4-2)$$

Para el valor de $\left(\frac{\sigma_Y}{Y}\right)^2$, se debe tener en cuenta que la única contribución directa en la ecuación de la eficiencia esta dada por la RDI 2, en el que se encuentra el pico de 364.48 KeV del ^{131}I ; por tal razón se toman los valores de la referencia del autor Bitar [27].

Con respecto al valor de $E_{i^{131}\text{I}}$, corresponde a el valor del promedio de las eficiencias de ^{131}I relacionadas en la tabla 4-1. De esta manera el valor de $E_{i^{131}\text{I}} = 8,76 \times 10^{-4}$. El valor de $\sigma E_{eq^{131}\text{I}}$ se puede encontrar calculado en la sección 4.3.

El valor de $C_{TOE_{RDR_i}}$ es el valor neto de cuentas para el trabajador, en cada una de las RDI; estos valores se encuentran referenciados en la tabla 4-6 .

Para obtener el valor de σC_{TOE} , es necesario realizar la desviación de las medidas de los conteos netos por RDI para cada medida del trabajador, para tal fin se emplea la Función de probabilidad de Poisson donde λ , es el número de ocurrencias del evento aleatorio por unidad de tiempo y x el número de ocurrencias de acuerdo a Canavos [4], para este caso las cuentas en la RDI seleccionadas:

$$p(x; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}; \quad (4-3)$$

Siendo $\lambda > 0$ y $x = 0, 1, 2, 3$. De esta manera tomando las propiedades de la función de probabilidad de Poisson se puede relacionar el valor de la varianza de con la desviación estándar, donde: $Var(x) = \lambda$. Siendo $Var(x)$ la varianza de la función de probabilidad de Poisson; así, para hallar en este caso particular la desviación estándar de $\sigma(C_{TOE})$ se tendría que : $\sigma(C_{TOE})^2 = \lambda = Var(x)$. Despejando $\sigma(C_{TOE})$:

$$\sigma(C_{TOE}) = \sqrt{\lambda} \quad (4-4)$$

Se seleccionó la distribución de probabilidad de Poisson, ya que es la distribución que se emplea para conocer tasas de fallos asociadas al uso de equipos tal como lo muestra la referencia del Ingeniero Zapata en su artículo [3]. Los resultados de $\sigma(C_{TOE})$ para cada RDI están dados en la Tabla 4-4.

Reemplazando cada uno de los datos obtenidos en la tabla anterior, en la ecuación 4-2, se obtiene la desviación de datos de la actividad medida para cada uno de los trabajadores. Para el trabajador evaluado (4) no se realiza el cálculo por dos razones, la primera es que no tiene un numero de cuentas válido mínimo en la RDI 2 ni en la RDI 3 para reemplazar, adicionalmente todas las actividades medidas registraron valores menores a la mínima actividad detectable, teniendo en cuenta que los periodos de monitoreo no alcanzan a satisfacer el valor de la AMD, descrita anteriormente. De la misma manera se debe aclarar que si bien no se tienen datos en algunas de las casillas de las ROI seleccionadas por trabajador, no significa que se deban excluir los periodos monitoreados de los resultados presentados, puesto que estos datos lo que representan es que dentro de dicha ROI, con el equipo de detección empleado no se tiene medida una actividad detectable de material radiactivo que se haya incorporado.

Trabajador evaluado	Fecha medición	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 1	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 2	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 3
TOE 1	09/02/2015	15	22	14
	11/09/2015	30	39	16
	18/09/2015	–	–	–
	02/10/2015	–	–	–
	19/10/2015	82	124	4
	20/10/2015	–	–	–
	30/10/2015	59	71	27
06/11/2015	41	50	29	
Trabajador evaluado	Fecha medición	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 1	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 2	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 3
TOE2	13/04/2015	26	42	12
	18/09/2015	–	–	–
	25/09/2015	12	24	1
	30/10/2015	44	56	19
	06/11/2015	24	46	27
	19/11/2015	–	–	–
	30/11/2015	21	38	8
14/12/2015	28	44	23	
Trabajador evaluado	Fecha medición	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 1	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 2	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 3
TOE 3	02/10/2015	–	–	–
	16/10/2015	–	–	–
	30/10/2015	34	45	22
	19/11/2015	–	–	–
	30/11/2015	–	–	–
	14/10/2015	28	42	27
	05/02/2016	30	38	10
Trabajador evaluado	Fecha medición	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 1	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 2	$\sigma(C_{TOE})$ RDI 3
TOE 4	02/10/2015	58	–	–
	16/10/2015	12	–	–
	30/10/2015	38	–	–

Tabla 4-4: Desviación estándar de los conteos para los TOE

Trabajador evaluado	Fecha medición	$\sigma(A_{mTOE})$
TOE 1	09/02/2015	0,12
	11/09/2015	0,09
	18/09/2015	–
	02/10/2015	–
	19/10/2015	0,28
	20/10/2015	0,06
	30/10/2015	0,06
	06/11/2015	0,07

Trabajador evaluado	Fecha medición	$\sigma(A_{mTOE})$
TOE 2	13/04/2015	0,11
	18/09/2015	–
	25/09/2015	0,71
	30/10/2015	0,08
	06/11/2015	0,08
	19/11/2015	–
	30/11/2015	0,15
	14/12/2015	0,08

Trabajador evaluado	Fecha medición	$\sigma(A_{mTOE})$
TOE 3	02/10/2015	–
	16/10/2015	–
	30/10/2015	0,08
	19/11/2015	–
	30/11/2015	–
	14/10/2015	0,07
	05/02/2016	0,12

Tabla 4-5: Desviación de actividades incorporadas por trabajador

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las cuentas netas (cuentas trabajador menos el fondo radiactivo) y actividades medidas con los 4 trabajadores que efectuaron labores de manipulación con ^{131}I del mes de septiembre de 2015 a febrero de 2016 (ver Tabla 4-6) con las respectivas incertidumbres de medida, teniendo en cuenta las restricciones del valor dadas en esta sección.

4.5 Calculo de Incertidumbres en las magnitudes involucradas en el resultado de la actividad medida al trabajador

TOE evaluado	Fecha medición	$C_{TOE_{RDR_1}}$	$C_{TOE_{RDR_2}}$	$C_{TOE_{RDR_3}}$	A (Bq)	Nivel medida
TOE 1	09/02/2015	232	499	198	$5,98 \times 10^1 \pm 0,12$	>NDR
	11/09/2015	885	1549	244	$4,06 \times 10^2 \pm 0,09$	>NDI
	18/09/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	02/10/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	19/10/2015	6645	15381	13	$7,40 \times 10^3 \pm 0,28$	>NDI*
	20/10/2015	5042	10161	788	$3,78 \times 10^3 \pm 0,06$	>NDI*
	30/10/2015	3502	5111	747	$7,68 \times 10^2 \pm 0,06$	>NDI
	06/11/2015	1666	2504	817	$1,86 \times 10^1 \pm 0,07$	>NDR**

TOE evaluado	Fecha medición	$C_{TOE_{RDR_1}}$	$C_{TOE_{RDR_2}}$	$C_{TOE_{RDR_3}}$	A (Bq)	Nivel medida
TOE 2	13/04/2015	701	1796	140	$8,58 \times 10^2 \pm 0,11$	>NDR
	18/09/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	25/09/2015	140	590	2	$3,91 \times 10^2 \pm 0,71$	<NDR**
	30/10/2015	1875	3173	362	$8,57 \times 10^2 \pm 0,08$	>NDR
	06/11/2015	585	2113	714	$7,83 \times 10^2 \pm 0,08$	>NDR
	19/11/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	30/11/2015	462	1437	57	$8,4 \times 10^2 \pm 0,15$	>NDR
	14/12/2015	772	1909	546	$5,38 \times 10^2 \pm 0,08$	>NDR

TOE evaluado	Fecha medición	$C_{TOE_{RDR_1}}$	$C_{TOE_{RDR_2}}$	$C_{TOE_{RDR_3}}$	A (Bq)	Nivel medida
TOE 3	02/10/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	16/10/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	30/10/2015	1129	2025	473	$3,77 \times 10^2 \pm 0,08$	<NDR**
	19/11/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	30/11/2015	—	—	—	<AMD	<AMD
	14/10/2015	775	1773	711	$4,38 \times 10^2 \pm 0,07$	<NDR**
	05/02/2016	909	1411	105	$3,5 \times 10^2 \pm 0,12$	<NDR**

TOE evaluado	Fecha medición	$C_{TOE_{RDR_1}}$	$C_{TOE_{RDR_2}}$	$C_{TOE_{RDR_3}}$	A (Bq)
TOE 4	02/10/2015	2720	—	—	<AMD
	16/10/2015	155	—	—	<AMD
	30/10/2015	1429	—	—	<AMD

Tabla 4-6: Resultados de las medidas actividad sobre los trabajadores monitorizados

Dentro de los principales resultados a destacarse en la Tabla 4-6 se evidencia, que los valores del nivel de investigación del Trabajador 1 denotados con (*), se produjeron por una emergencia radiológica con ^{131}I .

Se debe entender por emergencia radiológica al estado que puede declarar la autoridad competente cuando un suceso en una instalación perturba su funcionamiento normal hasta el punto de que

se puede llegar a originar un accidente con consecuencias para la instalación, sus trabajadores, la población o el medio ambiente.¹

La emergencia radiológica consistió en una cadena de eventos que serán brevemente relatados en vista a una interpretación adecuada del resultado:

El día de la manipulación de ^{131}I el trabajador 1 se encontraba realizando la preparación de cápsulas, pero por fallo de la micropipeta con la cual se realizan la dosificación procedió a realizar el ajuste de la misma, como también a realizar el ajuste de las tapas de las cápsulas de manera manual, el trabajador no empleó una máscara de filtro adecuada para la realización de estas actividades ni solicitó aprobación para el desarrollo de la misma a la coordinación de radiofarmacia. Como suceso adicional, este trabajador al manipular las cápsulas tuvo una contaminación fija significativa en extremidades. El cálculo estimado para un tiempo de conteo de 300 segundos con la sonda apuntando a pies y palmas de manos hacia arriba fue para la RDI 1 fue: 2961 Cuentas, para la RDI 2: 2045 cuentas y para la RDI3: 40 cuentas, el cálculo de la actividad superficial contaminada en extremidades no se plantea, ni se descuenta al resultado obtenido en la tabla 4-6, por esta razón se puede deducir que dicha medida se está sobre estimando. Como dato adicional, al día siguiente en la monitorización realizada, el valor de la actividad medida decayó a cerca del 53 % de la medida inicial.

Los valores denotados con (**) en la tabla 4-6, hacen referencia a los valores por debajo del nivel de registro para las 8 semanas de monitoreo, esto se debe a que el tiempo de conteo empleado fue elevado basado en la premisa del monitoreo 52 semanas al año, donde se necesitaba un nivel derivado de registro más bajo que el calculado inicialmente en el capítulo 2.

4.6. Cálculo de incorporaciones y dosis efectivas comprometidas

Como resultado final se muestran los valores de incorporación y las dosis efectivas comprometidas de acuerdo a la metodología evaluada en la sección 2.2.3 para cada uno de los trabajadores en el periodo de monitorización.

¹<http://https://www.csn.es/emergencias/que-es-una-emergencia-radiologica>

Trabajador evaluado	Fecha medición	Incorporación (Bq)	E(50) mSv
TOE 1	09/02/2015	$2,7 \times 10^3$	0,030
	11/09/2015	$1,83 \times 10^4$	0,2
	18/09/2015	<AMD	<AMD
	02/10/2015	<AMD	<AMD
	19/10/2015*	$3,33 \times 10^5$	3,7
	20/10/2015*	$1,7 \times 10^5$	1,9
	30/10/2015	$3,46 \times 10^4$	0,38
	06/11/2015	$8,39 \times 10^2$	0,009
Trabajador evaluado	Fecha medición	Incorporación (Bq)	E(50) mSv
TOE 2	13/04/2015	$3,9 \times 10^4$	0,78
	18/09/2015	<AMD	<AMD
	25/09/2015	$1,78 \times 10^4$	0,36
	30/10/2015	$3,9 \times 10^4$	0,78
	06/11/2015	$3,56 \times 10^4$	0,71
	19/11/2015	<AMD	<AMD
	30/11/2015	$3,82 \times 10^4$	0,76
	14/12/2015	$2,44 \times 10^4$	0,27
Trabajador evaluado	Fecha medición	Incorporación (Bq)	E(50) mSv
TOE 3	02/10/2015	<AMD	<AMD
	16/10/2015	<AMD	<AMD
	30/10/2015	$1,74 \times 10^4$	0,19
	19/11/2015	<AMD	<AMD
	30/11/2015	<AMD	<AMD
	14/10/2015	$1,99 \times 10^4$	0,22
	05/10/2015	$1,54 \times 10^4$	0,18
	Trabajador evaluado	Fecha medición	E(50) mSv
TOE 4	02/10/2015	<AMD	
	16/10/2015	<AMD	
	30/10/2015	<AMD	

Tabla 4-7: Resultados de estimaciones de dosis efectivas comprometidas $E(50)$ para trabajadores monitorizados .

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

La medición directa representa una valiosa herramienta a la hora de que se presenten incorporaciones debido a emergencias radiológicas en la manipulación de ^{131}I , ya que se puede tomar la medida de incorporación de material radiactivo casi inmediatamente para estimar la dosis efectiva comprometida; aunque sobre esta afirmación hay que tener especial cuidado cuando el trabajador presenta contaminaciones superficiales en la piel o extremidades que pueden igualmente presentarse cuando ocurre una emergencia de esta índole, por tal razón es conveniente tener a mano otra herramienta que permita la estimación de la actividad medida ajena a el órgano objeto de la medición para tener de esta manera en cuenta las contribuciones externas.

Algunas de las emergencias encontradas en el seguimiento a los trabajadores que manipularon ^{131}I en circunstancias poco usuales, que potencialmente pueden generar incorporación son:

- Olvido del vial fuera de la cabina presurizada.
- Fallo de los sistemas de ventilación de la cabina donde se manipula ^{131}I .
- Fallo en el aseguramiento del blindaje que contiene el vial con solución concentrada de ^{131}I .
- Derrame inadvertido de ^{131}I , fuera de la cabina de manipulación.

Si bien representa la medición directa una gran herramienta para la medición de incorporaciones agudas en caso de emergencia como se mencionó anteriormente, igualmente también lo representa para situaciones normales de manipulación de ^{131}I , en las que pueda existir incorporaciones por encima del nivel de registro. Dichas medidas detectadas pueden que pueden dar cabida al mejoramiento de la actividad de los trabajadores por medio de la implementación de elementos de protección personal adicionales a la practica para evitar dosis efectivas comprometidas a largo o corto plazo dentro de la práctica de radiofarmacia.

La pertinencia del programa de vigilancia radiológica y de la metodología empleada está expresada claramente en los resultados obtenidos de las mediciones a cada uno de los trabajadores, ya que si bien en algunos casos la actividad era tan pequeña o mínima para ser detectada, en otros de los casos como el resultado presentado en la emergencia radiológica, puede evidenciarse la importancia de conocer las dosis efectivas incorporadas y su magnitud, así como las consecuencias que a futuro puede tener dicha medida, por razonablemente baja que esta sea.

De la misma manera se puede evidenciar como el grado de sobreestimación o subestimación de la dosis dependerá del margen global de retención en el cuerpo [8], ya que dentro del caso de emergencia radiológica y las medidas posteriores a la actividad incorporada, puede verse como existe una retención de material radiactivo, ya que desde producida la emergencia este trabajador dejó de realizar labores en el área de ^{131}I , y por ende la probabilidad de incorporación era nula, pero sin embargo podía aun evidenciarse rastros de la incorporación aguda sufrida en la última fecha medida del trabajador 1.

Dentro del programa de vigilancia radiológica individual, el cálculo de los periodos de monitoreo para el personal que esta involucrado con la manipulación de ^{131}I , este adicionalmente debería contemplar que así se manipule o no todos los trabajadores del centro deben contar con la misma cantidad de medidas para el periodo, de esta manera puede establecerse que se pueda cumplir con un NDR y NDI por instalación.

Debido a la importancia que tiene conocer con veracidad las medidas tomadas con el detector empleado en un programa de vigilancia radiológica individual es necesario garantizar que las mismas se encuentren dentro de un rango de certeza adecuado, para poder aproximar de la manera más eficaz la actividad incorporada en el trabajador; por esta razón procesos rutinarios en la calibración del mismo son de gran relevancia para poder estimar correctamente los resultados de la medida, como esta mencionado en el artículo de Arciniegas [26]

Existe una limitación para el sistema de medición presentado en este trabajo con respecto a la actividad mínima detectable, puesto que para llegar a un nivel derivado de registro relacionado a una dosis efectiva comprometida de 1 mSv (nivel de público), con un periodo de monitoreo de 52 semanas, los tiempos de conteo resultarían extremadamente largos y generarían incomodidad para la adquisición de los datos del trabajador. [26]

De la misma manera, haciendo referencia al número de periodos de monitorización, debe tenerse en cuenta los periodos de vacaciones de cada uno de los trabajadores para descontar esas semanas de los periodos contemplados en las 52 semanas totales calculadas inicialmente para el programa de vigilancia radiológica.

Se ha complementado el instructivo institucional del INC mostrado en el anexo 6, con los pasos respectivos para el procedimiento de calibración cruzada con ^{133}Ba , puesto que este antes de la implementación del programa solo se encontraba realizado para el ajuste del detector de pozo.

Se ha creado el instructivo institucional del INC mostrado en el anexo 7, con los pasos respectivos para el procedimiento de dosimetra interna del trabajador, donde se especifica cuales son los pasos a seguir para realizar el procedimiento y el correcto diligenciamiento de los registros dosimétricos asociados al desarrollo de la práctica

Como resultado de el presente trabajo fueron presentados y publicados 2 artículos en el X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica Realizado en Buenos Aires, Argentina del 12 al 17 de abril de 2015 titulados: "CALIBRACIÓN EQUIPO PARA DOSIMETRÍA INTERNA DE TRABAJADORES OCUPACIONALES DE RADIOFARMACIA" e

”IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE VIGILANCIA RADIOLÓGICA, PARA TRABAJADORES EN RADIOFARMACIA”, que se encuentran reseñados en la bibliografía del trabajo y en los anexos 8 y 9, respectivamente.

Teniendo en cuenta la implementación piloto del programa de vigilancia radiológica y algunos de sus principales factores que lo afectan como : 1. El número de semanas monitoreadas, 2. La actividad de ^{131}I , que maneja el centro, 3. El número de trabajadores, 4. El método de medición, entre otros, no se encuentra viable realizar una comparación somera con otros estudios realizados y denotados dentro de la bibliografía. Esto debido que para poder compararse de una manera adecuada la implementación del programa de vigilancia radiológica, debería ser aproximadamente igual las condiciones denotadas anteriormente. De la misma manera al ser este un programa ”piloto” lo que se busca es que otras instalaciones puedan tener un referente bibliográfico para adaptar sus condiciones a las presentadas por recomendaciones del OIEA y del ICRP tal como se desarrollo en la metodología de este escrito, puesto que actualmente a nivel nacional no se realizan de manera constante dichas mediciones sino esporádicamente, en casos de emergencias radiológicas o siguiendo otros métodos indirectos de medición, por lo cual la comparación con otros estudios tampoco es factible.

5.2. Recomendaciones

Si bien en las Normas Básicas Internacionales de Seguridad [9] se presentan varias tablas de los valores de $m(t)$ para las diferentes formas químicas en que el ^{131}I , puede sublimarse, se tuvo en cuenta el valor de $m(t)$ solo para partículas de $5\mu\text{m}$ tamaño y no para tipos de vapor o partículas de $1\mu\text{m}$.

De acuerdo a lo establecido en la guía del OIEA debería existir una medida inicial del trabajador (nivel de fondo del trabajador) antes que empiece a laborar, ese resultado debería ser con el que se comparen las mediciones posteriores.

Se debería aplicar la recomendación de la guía del OIEA [8], de aplicar frotis en piel para examinar el nivel de contaminación superficial, antes de tomar una medida de forma directa en la tiroides

Se debe realizar un protocolo de mediciones post-emergencia radiactiva para no sobre-estimar las medidas de los días consecutivos a la incorporación aguda, de la misma manera tener los pasos a seguir en caso de que el trabajador tenga una medida representativa de actividad incorporada, relacionados con la ingesta de agentes bloqueadores de la glándula tiroides o recomendaciones para acelerar la excreta del ^{131}I incorporado.

Se debe tener en cuenta el uso de protectores respiratorios en caso de derrame de ^{131}I , contención del derrame y actividades de dispensa de residuos; tales como filtros respiratorios apropiados al tamaño de partícula, ya que según lo recomendado por el OIEA [8], de acuerdo al número de

repetición de estas y la actividad que esté involucrada en el proceso podría darse una incorporación por encima del nivel de registro.

Se debe examinar el posicionamiento del trabajador, ya que estar sentado en una sola posición es incómodo cuando se tratan tiempos largos de conteo.

La dosis efectiva comprometida, si bien ha sido calculada a partir de los resultados de control directo en tiroides, es relativamente independiente de los supuestos acerca del tiempo de incorporación, por tanto aporta una base mucho más fiable para interpretar los resultados de la vigilancia radiológica rutinaria para el caso del yodo radioactivo; pero igualmente debe tenerse en cuenta el análisis de orina, que en casos como el mencionado anteriormente (emergencia radiológica), hubiese ayudado a calcular mejor una incorporación significativa, sin contribuciones del fondo de radiación en la piel y extremidades contaminadas del trabajador de acuerdo a lo mencionado en la guía de seguridad del OIEA [8]

Como recomendación para las Unidades de Medicina Nuclear o Radiofarmacias que manipulen ^{131}I o sus residuos si se opta por seguir una metodología para la implementación de un programa de vigilancia radiológica se podrían tener en cuenta los siguientes pasos:

- Esclarecer si se necesita o no el programa mediante el factor decisión.
- Establecer los Periodos de manipulación del trabajador al que se le realizará seguimiento.
- El número de trabajadores que se encuentran en las labores de manipulación de ^{131}I
- El conocimiento de las condiciones de manipulación de ^{131}I en circunstancias normales y de emergencia, que pueden llevar a dosis anómalas históricas por instalación.
- La infraestructura con la cual cuenta el centro (barreras físicas, equipos de monitoreo, fuentes para la calibración de equipo, etc)


Bibliografía

- [1] CIS bio international. Ficha técnica i-131. 2016.
- [2] Baird. C. *Experimentación, Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. Prentice Hall, 1991.
- [3] Zapata. C. Estimación de tasas de fallas de componentes en casos de ausencia de datos o cantidades limitadas de datos, Abril 2005.
- [4] Canavos.G. *Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos*. Mc graw-Hill.
- [5] CIEMAT. Curso de supervisores de instalaciones radiactivas. módulo de dosimetría interna. CIEMAT, 2013.
- [6] CSN CIEMAT. Curso de supervisores instalaciones radiactivas (ir) módulo básico. tema 4, 2013.
- [7] EURACHEM / CITAC. Quantifying uncertainty in analytical measurement guide cg 4, 2012.
- [8] Organismo Internacional de Energía atómica (OIEA). Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides. rs-g-1.2, 1999.
- [9] Organismo Internacional de Energía atómica (OIEA). Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards, Agosto 2014.
- [10] Ministerio de Minas y Energía. Resolución 90874 de 2014 (agosto 11), 2014.
- [11] Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (Cuba). Informe de reunión de expertos, buenos aires. arcallxxviii programa de monitoreo individual en contaminación interna, 2005.
- [12] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Recommendations of the icrp publication 26, 1977.
- [13] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Limits for intakes of radionuclides by workers, 1979.
- [14] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Individual monitoring for intakes of radionuclides by workers, 1989.
- [15] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 1, 1990.
- [16] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 2 ingestion dose coefficients, 1993.

- [17] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Human respiratory tract model for radiological protection, icrp publication 66, 1994.
- [18] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 3 ingestion dose coefficients, 1995.
- [19] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 4 inhalation dose coefficients, 1995.
- [20] Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Individual monitoring for internal exposure of workers., 1997.
- [21] Howard.B. Safe handling of radioiodinated solutions. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 2017.
- [22] Prekeges. J. *Nuclear Medicine Instrumentation*. Jones y Bartlett Learning, 2013.
- [23] National Commission of Radiation Protection. Ncrp report no 58 handbook of radioactivity measurement procedure, 1984.
- [24] Corporación química venezolana. Hoja de seguridad. alcohol etílico.
- [25] Pigford. T. Environmental aspects of nuclear energy production, 1974.
- [26] Arciniegas M.A y Cols. Calibración equipo para dosimetría interna de trabajadores ocupacionales de radiofarmacia. *X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica*, 2015.
- [27] Bitar. A y Cols. Assessment of intake and internal dose from iodine-131 for exposed workers handling radiopharmaceutical products. ScienceDirect, 2013.
- [28] Carneiro. L y Cols. Internal dosimetry of nuclear medicine workers through the analysis of i-131 in aerosols, 2015.
- [29] Castellani. CM y Cols. Guía ideas (versión 2) para la estimación de la dosis comprometida a partir de los datos de la vigilancia de la incorporación, 2013.
- [30] Clement.C H y Cols. Annals of the icrp publication 130 occupational intakes of radionuclides: Part 1.
- [31] Delacroix.D y Cols. *Radionuclide an radiation protection data handbook*. Nuclear Technology Publishing, 2002.
- [32] Genicot. J y cols. Direct determination of radionuclides in the body optimisation of measurements parameters and results analysis. *World Journal of Nuclear Science and Technology*,, 2011.
- [33] Lucena. A. y Cols. Evaluation of internal exposure of nuclear medicine staff through in vivo and in vitro bioassay techniques. *Radiation Protection Dosimetry*, 2007.
- [34] Puerta. A y Cols. The first programme of assesment of occupational exposure due to intake of i-131 in the practice of nuclear medicine in venezuela.

-
- [35] Puerta. A y Cols. Informe de reunión de expertos, buenos aires., 2006.
- [36] Puerta. A y Cols. Recomendaciones para la medición de i-131 en la tiroides humana usando un detector de nal(ti). Number 1, 2010.
- [37] Rivero.G y Cols. Aplicaciones clínicas del radioyodo (i-131) en las enfermedades del tiroides. *Revista Cubana de Endocrinología.*, 2012;23(3):256-263.
- [38] Siegel. J y Cols. Mird pamphlet no.16: Techniques for quantitative radiopharmaceutical bio-distribution data acquisition and analysis for use in human radiation dose estimates, 1999.
- [39] Sánchez.. M y Cols. Implementación del programa de vigilancia radiológica, para trabajadores en radiofarmacia., 2015.
- [40] Vidal. A y Cols. A methodology for auto-monitoring of internal contamination by i-131 in nuclear medicine workers. *Radiation Protection Dosimetry*, 2007.

6. Instructivo para la calibración del equipo CAPTUS 3000

 <p>Por el control del cáncer</p>	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 1 de 10		

RESPONSABLE	
GRUPO	CARGO
Medicina Nuclear	Físico Médico/Oficial de Protección Radiológica

En este instructivo se describen los pasos para realizar la calibración y control de calidad de el pozo y la sonda del equipo Captus 3000

CALIBRACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD EQUIPO CAPTUS 3000

Las pruebas realizadas para el pozo y la sonda son:

1. Revisión de los parámetros: chequear hora, fecha, datos de librería y tiempos de conteo
2. Calibración en energía Linealidad
3. Prueba de constancia



1. Revisión de los parámetros


Consiste en chequear hora, fecha y fecha de calibración de la fuente, datos de librería de isótopos, configuraciones de las pruebas.

2. Calibración del pozo del equipo

2.1. Calibración en energía:

- Tome la fuente de lápiz de Cs-137 con actividad de 1.037 μCi (medida el 1 de Marzo de 2011)¹ e introdúzcala en el pozo de la sonda Captus 3000. Tenga en cuenta que en el interior del pozo debe quedar la parte activa de la fuente, que es la parte negra de la misma.
- Verá que a el pozo se encuentra acoplado un computador, revise la pantalla y encontrará un acceso directo al software que controla dicho equipo. Dicho acceso directo tiene el nombre Captus-3000, dé *click* en dicho acceso directo. Se desplegará la ventana de autenticación de usuario, en donde deberá introducir **radiofarmacia** como nombre de usuario (user name) y **radiofarmacia** como contraseña (*password*), luego dé clic en OK.
- Aparecerá una ventana con varias herramientas, de las cuales debe escoger la correspondiente

¹ Se usa Cs-137 porque tiene dos picos uno de baja energía y uno de alta 662 keV y 32 keV.

 <p>Por el control del cáncer</p>	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 2 de 10		

a aseguramiento de calidad, para ello debe dar clic en el menú **QUALITY ASSURANCE**, que aparece en la parte superior de la ventana. Se desplegará una nueva ventana con otras herramientas y debe seleccionar **AUTO CALIBRATION**, como detector elija el pozo (*well*) e inicie la autocalibración dando clic en **START PROCEDURE**. El software preguntará si la fuente de Cs-137 está en el pozo (*Position Cs-137 source in well?*), pero ya que la fuente se introdujo correctamente desde el principio, simplemente hay que dar clic en OK. La medición durará 25 segundos.

- Cuando este proceso se pone en marcha el espectro aparece en cuentas por canal y se extraen los datos del pico de alta y baja energía en su respectivo canal, la ganancia, el umbral (*threshold*) y el ancho a la mitad de la altura máxima (FWHM).
- La última línea contiene la FWHM del pico, esta deberá ser menor a 8% en todos los casos, si este es mayor notifique al Físico Médico.

2.2. Linealidad

El software tiene una calibración de linealidad de la energía en función del canal de respuesta punto a punto usando las energías de los gamma del Eu-152, esta función muestra cualquier no linealidad en la respuesta de los detectores de NaI y permite garantizar una respuesta lineal y una exactitud en la identificación de los picos de cada energía. Además, el sistema calcula la desviación porcentual del ajuste a una línea recta con pendiente de 2keV/canal de cada pico de energía de la fuente..


- El software preguntará si usted desea realizar la prueba de linealidad con la fuente de Eu-152 (*Perform linearity correction with Eu-152?*), antes de responder a la pregunta, retire la fuente de Cs-137 e introduzca en el pozo la fuente de lápiz de Eu-152 con actividad de 500nCi (registrada el 1 de marzo de 2007). Una vez introducida la fuente de Eu-152, dé clic en **YES** para iniciar la prueba de linealidad.
- Durante la prueba saldrán los 5 picos característicos del Eu-152². Al terminar la prueba de linealidad, el software arrojará los valores de energía calculada para cada uno de los picos del Eu-152. El software también arrojará el porcentaje de diferencia con respecto al valor teórico de la energía de cada fotópico del Eu-152, dicho porcentaje no debe superar 10%, pero si supera dicho valor, avise al Físico Médico.

2.3. Prueba de constancia:

Esta prueba compara la actividad del Cs-137 medida con la que ingreso en la configuración. La actividad de entrada en la configuración es corregida ya que esta ha decaído. Las cuentas medidas son transformadas por actividad usando los valores de eficiencia de cada isótopo que están en la librería del equipo.

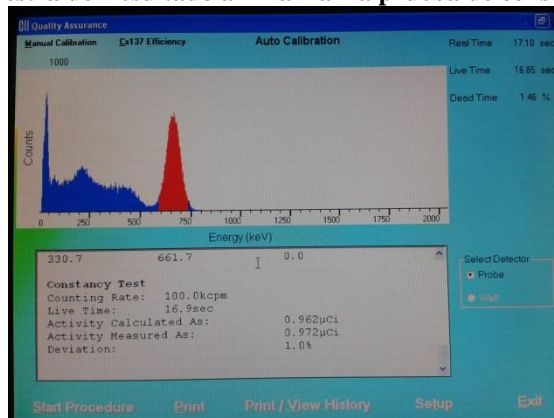
- Una vez terminada la prueba de linealidad, el software preguntará si desea hacer una prueba de constancia (*Perform Constancy test?*), pero esto se hace con la fuente de Cs-137, por lo que antes de contestar a la pregunta, hay que sacar la fuente de Eu-152 del pozo y de nuevo

² La linealidad es realizada con Eu- 152 ya que tiene múltiples gammas en un rango de 41 keV a 1,408 keV.

 Por el control del cáncer	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 3 de 10		

introducir la fuente de Cs-137 que se utilizó en el paso 1 y ahí si dar *clíc* en Yes, para empezar la prueba de constancia.

Figura 1 Muestra del resultado al finalizar la prueba de constancia



- La desviación entre la actividad calculada y medida es un error porcentual y debe estar dentro de $\pm 5\%$. Si la desviación está fuera del $\pm 5\%$, se mostrara como ALTA en rojo en ese caso es necesario revisar si en el cuarto hay fuentes ya que los cristales de NaI son muy sensibles.
- Una vez terminada ésta prueba, el software mostrará un texto, el cual debe seleccionar y copiar con la ayuda del teclado (con ctrl + c), y luego pegar el texto en el editor de texto *notepad* (block de notas). Para esto es necesario salir del software Captus 3000 sin cerrarlo, esto es posible digitando la tecla "Windows" (tecla que se encuentra entre las teclas ctrl y alt, cuyo logotipo es una ventana), que mostrará el menú inicio, desde donde se podrá abrir la aplicación *notepad* y pegar el texto (con un ctrl + v). Una vez pegado el texto, hay que dirigirse al menú archivo de notepad (file) y allí seleccionar guardar como (save as). El texto se guarda con el nombre **auto calibración dd-mm-año**, en donde **dd-mm-año** es la fecha en la que se realizó la calibración.


3. Calibración de la sonda del equipo

3.1. Calibración en energía:

- Tome la fuente tipo lápiz de Cs-137 con actividad de 1.007 μCi (medida el 1 de Marzo de 2011)³ y ubíquela dentro de la sonda del equipo Captus 3000 que se ha posicionado verticalmente observe la Figura 2 de tal forma que la parte activa (parte negra) quede en contacto con la superficie del detector.

Figura 2 Ubicación de la fuente de calibración de Cs-137 para la calibración en energía y prueba de constancia de la sonda del equipo Captus 3000


³ Se usa Cs-137 porque tiene dos picos uno de baja energía y uno de alta 662 keV y 32 keV.

 <p>Por el control del cáncer</p>	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 4 de 10		



- Verá que a la sonda se encuentra acoplado un computador, revise la pantalla y encontrará un acceso directo al software que controla la sonda. Dicho acceso directo tiene el nombre Captus-3000, dé *clik* en dicho acceso directo. Se desplegará la ventana de autenticación de usuario, en donde deberá introducir **radiofarmacia** como nombre de usuario (user name) y **radiofarmacia** como contraseña (*password*), luego dé clic en OK.
- Aparecerá una ventana con varias herramientas, de las cuales debe escoger la correspondiente a aseguramiento de calidad, para ello debe dar clic en el menú **QUALITY ASSURANCE**, que aparece en la parte superior de la ventana. Se desplegará una nueva ventana con otras herramientas y debe seleccionar **AUTO CALIBRATION**, como detector elija la sonda (*probe*) e inicie la autocalibración dando clic en **START PROCEDURE**. El software preguntará si la fuente de Cs-137 está ubicada adecuadamente para la medida con la sonda (*Position Cs-137 source in probe?*), pero ya que la fuente se ubicó correctamente desde el principio, simplemente hay que dar clic en OK. La medición durará alrededor de 60 segundos.
 - Cuando este proceso se pone en marcha el espectro aparece en cuentas por canal y se extraen los datos del pico de alta y baja energía en su respectivo canal, la ganancia, el umbral (*threshold*) y el ancho a la mitad de la altura máxima (FWHM).
 - La última línea contiene la FWHM del pico, esta deberá ser menor a 8%, valor que puede incrementarse hasta un 11% dependiendo del tiempo de vida del detector, en todos los casos, si este es mayor notifique al Físico Médico.

3.2. Linealidad

 Por el control del cáncer	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 5 de 10		

La prueba de linealidad para la sonda es realizada posterior a la culminación de la prueba de calibración en energía. El software preguntará acabada la prueba de calibración en energía si la fuente de Eu-152 está ubicada adecuadamente para la medida con la sonda (*Position Eu-152 source in probe?*), se introduce dentro de la sonda del mismo modo que la fuente para calibración de energía, una vez ubicada la fuente simplemente hay que dar *click* en OK. La medición durará alrededor de 150 segundos. La fuente es la misma usada para la prueba de linealidad del pozo.

3.3. Constancia.

La prueba de constancia para la sonda es realizada posterior a la culminación de la prueba de linealidad. El software preguntará acabada la prueba de linealidad si prosigue con la prueba de constancia (*Performy constancy test?*) Y luego si la fuente de Cs-137 está en posición para realizar la nueva medida (*Position source in probe?*), para lo cual se ubica la fuente tipo lápiz usada en la prueba de calibración de energía para la sonda dentro de la sonda del equipo Captus 3000, de manera idéntica a como se realizó en la prueba de calibración de energía, una vez ubicada la fuente simplemente hay que dar *click* en OK.

4. Medición del factor de calibración para I-131 con Ba-133 para la geometría en dosimetría interna

El software del equipo Captus se selecciona en la opción MultiChannel Analyzer (MCA). La ROI seleccionada debe estar en el rango de 242 keV a 435 keV. Se realiza la medición del fondo en esta ROI durante 60 s. Usando el maniquí BIODEX (Ver Figura 3) propuesto por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés) para que ser usado en la calibración de sondas para evaluación incorporación de I-131 en tiroides (ver Figura 4), se ubica el maniquí a una distancia de 1 cm del extremo de la cubierta del detector, ubicando previamente la fuente de Ba-133 dentro del maniquí a la cual se debe retirar la tapa para un ajuste adecuado. Dentro del ROI se encuentran 4 picos de energía del Ba-133, el de 276 keV con una emisividad de 0.0716; el de 302.8 keV con una emisividad de 0.1834; el de 356 keV con una emisividad de 0.6205 y la de 383.8 keV con una emisividad de 0.0894.


 <p>Por el control del cáncer</p>	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
		Página 6 de 10	

Figura 3 Maniquí para calibración de sonda del equipo Captus 3000

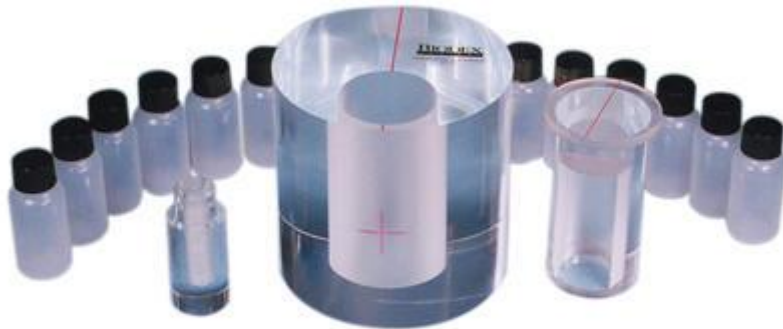



Figura 4 Esquema de ubicación del maniquí de cuello para medición de eficiencia

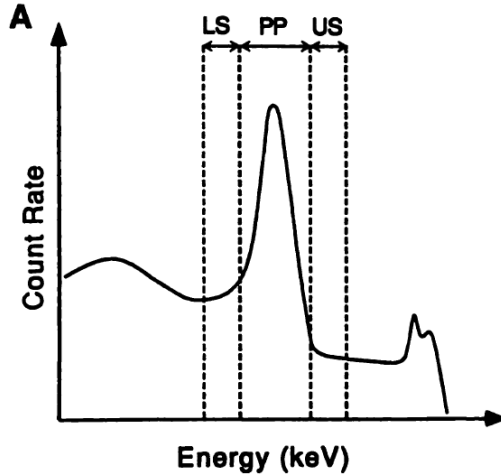


Con el fin de considerar la contribución de retrodispersión en el espectro, se aplica el método de las tres ventanas, el cual pretende realizar la corrección por contribución de retrodispersión a la región de interés considerada. Para ello se escogen dos ventanas, una inferior y una superior a la ROI de un ancho en energía equivalente a la mitad del de la ROI (Ver Figura. En este caso, la

 <p>Por el control del cáncer</p>	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 7 de 10		

ventana inferior tendría un intervalo de 96 keV por debajo de los 242 keV y de 96 keV por encima de los 435 keV. Estas ventanas deben ser configuradas en la herramienta MCA.

Figura 5 Esquema de selección de las ventanas en el método de triple ventana



Se realiza la corrección de la siguiente manera para la ROI principal

$$C_T = C_{ROI} - C_{VI} - C_{VS}$$

Donde C_{ROI} son las cuentas netas en la ROI, C_{VI} representa las cuentas netas en la ventana inferior y C_{VS} representa las cuentas netas en la ventana superior.


Se calcula la eficiencia del detector de NaI(Tl) para las emisiones en los picos de energía del Ba-133 como

$$E_{Ba-133} = \frac{C_T}{T(s) \cdot A(Bq) \cdot \sum Y_{Ba-133}}$$

donde T es el tiempo de conteo, A la actividad de la fuente, $\sum Y_{Ba-133}$ es la suma de la proporción de emisiones dentro de los picos considerados en la ROI y C_{neto} son las cuentas netas dentro de la ROI definida para los picos de energía del Ba-133 considerados, en el caso de la ROI de 242 a 435 keV se tiene que $\sum Y_{Ba-133} = 0.9649$

Se define que la eficiencia equivalente de I-131 es aquella en la cual la tasa de conteo en la ROI es igual para ambos radionucleidos (Ba-133 y I-131), de modo que se cumple la expresión que se muestra a continuación:

$$E_{eq I-131} = E_{Ba-133} \frac{\sum Y_{I-131}}{\sum Y_{Ba-133}}$$

 <p>Por el control del cáncer</p>	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
Página 8 de 10			

Siendo $\sum Y_i$ la sumatoria de las emisividades de los fotopicos comprendidos en la ROI del espectro de la fuente i .

La eficiencia equivalente de I-131 es un parámetro que permite determinar la actividad en los casos de conteo de I-131, de forma tal que para una tasa de conteo determinada de I-131 se tiene

$$A_{I-131} = \frac{cps_{T I-131}}{E_{eq I-131}}$$

De esta manera se permite conocer la actividad para I-131 en la ROI descrita anteriormente, en la geometría de calibración recomendada para dosimetría interna de los trabajadores.

5. Valoración de la actividad mínima detectable AMD para dosimetría interna


El software del equipo Captus se selecciona en la opción MultiChannel Analyzer (MCA). En el ROI de 242 a 435 keV se realiza la medición de fondo para la sonda. Se configura el tiempo de conteo en la sección *counting setup*. Se inicia la prueba dando click en Start.

El valor de cuentas de fondo C_f y el tiempo de conteo T en segundos usan para calcular la AMD a través de la siguiente relación (NCRP, 58) de acuerdo a la estadística de Currie:

$$AMD = \frac{4.65\sqrt{C_f} + 2.71}{T \cdot E}$$

6. Mediciones de superficies de trabajo a través del pozo:


De una manera similar a como se realizó en la calibración de la sonda, abra la página principal del software de la sonda Captus-3000, solo que en éste caso no hay que dar clic en *quality assurance*, sino debe seleccionar la opción **wipe test** que encontrará a la derecha. Saldrá una lista de ubicaciones (*wipe localizations*) y debe seleccionar una de las áreas en las que realizó el frotis, debe tener presente el área que seleccionó, pues más adelante debe introducir en el pozo de la sonda, el tubo de ensayo correspondiente a dicha área. En la parte inferior de la ventana encontrará un cuadro llamado "preset groups" en donde debe seleccionar **work areas** (áreas de trabajo), dé clic en la opción **count** que aparece a la derecha de la ventana, luego dé clic en el botón **background** ubicado en la parte inferior izquierda, asegúrese de que el pozo está vacío, (pues lo que se va a medir es la radiación de fondo en el pozo), presione OK para empezar la medida que durará 60 segundos. Una vez termina la medición del fondo, el software preguntará si acepta la medida (*Accept Measurement?*) a lo que contestará dando clic en "yes". El valor de fondo no debe superar las 2000 cpm (cuentas por minuto), de no ser así, significa que el pozo se encuentra contaminado y habrá que esperar que la contaminación radiactiva decaiga, o hacer un procedimiento de limpieza del pozo.

	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.	CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000	VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 9 de 10		

Si el pozo no se encuentra contaminado, introduzca en el pozo el tubo de ensayo que corresponda al área de trabajo que previamente seleccionó y dé *click* en "*count*", se desplegará una ventana, oprima "*ok*". Los resultados son almacenados automáticamente por el sistema. Repita el anterior procedimiento para cada tubo de ensayo.

7. Registro de la calibración


Al finalizar la calibración se debe guardar electrónicamente en la carpeta Reports del software del equipo Captus 3000 el registro de calibración exitosa mostrado por el equipo, para ello se debe copiar el texto que aparece en la parte inferior del entorno de *Autocalibration* a un bloc de notas y guardar el registro en formato txt denominándolo autocalibracion equipo fecha.txt. Por ejemplo autocalibracion sonda 05-05-2014.txt.

	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA E.S.E.		CÓDIGO:	AOE-P04-I-10
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA		VERSIÓN:	01
	INSTRUCTIVO PARA LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000		VIGENCIA:	23-07-2013
	Página 10 de 10			

"TODA VERSIÓN IMPRESA DE ESTE DOCUMENTO SE CONSIDERA DOCUMENTO NO CONTROLADO"

ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Cargo:	Físico Médico	Cargo:	OPR	Cargo:	Coordinador
Dependencia:	Medicina Nuclear	Dependencia:	Subdirección Médica	Dependencia:	Radiofarmacia
Fecha:	17-07-2013	Fecha:	17-07-2013	Fecha:	23-07-2013


7. Descripción de la actividad para realizar dosimetría interna a trabajadores de la radiofarmacia ocupacionalmente expuestos a ^{131}I

	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE	CÓDIGO:	AOE-P04-D-06
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	02
	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PARA REALIZAR DOSIMETRÍA INTERNA A TRABAJADORES DE LA RADIOFARMACIA OCUPACIONALMENTE EXPUESTOS A I-131	VIGENCIA:	08-08-2016
			Página 1 de 5


RESPONSABLE	
GRUPO	CARGO
Radiofarmacia	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica

Dosimetría interna de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a I-131 de la radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología E.S.E

Nº	NOMBRE DE LA TAREA	EJECUTOR DE LA TAREA	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA
1	Calibración de la sonda Captus 3000	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	Se hace la calibración de la sonda antes de realizar cualquier medida de acuerdo al instructivo "AOE-P04-I-10 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000" antes de realizar las mediciones en los trabajadores de la radiofarmacia. Se registra la fecha y hora de la calibración en las columnas "Fecha de calibración" y "Hora de calibración", respectivamente, como también el chequeo correspondiente en la columna "Calibración (Si/No)" si se realizó exitosamente la calibración o si ya existe una exitosa previamente realizada el mismo día en el formato "AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA" .
2	Calibración de la eficiencia para I-131 para la geometría de medida.	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	Se estima la eficiencia para I-131 de la sonda Captus 3000 midiendo con la fuente de Ba-133 con el maniquí BIODEX de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 4 del instructivo "AOE-P04-I-10 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CAPTUS 3000" . Se registra la medida en la columna "Eficiencia del detector I-131(%)" en el formato "AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA" .
3	Configuración del equipo Captus 3000 para medición	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	Se ingresa a la herramienta MultiChannel Analyzer (MCA). Se configura en la sección Counting setup el tiempo de medida en segundos (dependiente si la medida es del fondo radiactivo o se va a realizar al trabajador). Se deberán configurar las ROI's de la siguiente manera: ROI 1: 146 keV (canal 73) a 242 keV (canal 121); ROI 2 (principal): 242 keV (canal 121) – 436 keV (canal 218); ROI 3: 436 keV (canal 218) – 533 keV (canal 266), esto con el fin de realizar la corrección por retrodispersión.

	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE	CÓDIGO:	AOE-P04-D-06
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	02
	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PARA REALIZAR DOSIMETRÍA INTERNA A TRABAJADORES DE LA RADIOFARMACIA OCUPACIONALMENTE EXPUESTOS A I-131	VIGENCIA:	08-08-2016
			Página 2 de 5

4	Medición del fondo radiactivo con la sonda	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>La configuración de tiempo de conteo para fondo es de 120 s (<i>live time</i> en <i>counting setup</i> de opción MCA). Se inicia el conteo dando click en <i>Start</i>. Al finalizar el tiempo de conteo, se registra el número de cuentas de fondo en cada ROI, cuya cantidad se observa en la casilla <i>Integral</i>, se deben registrar los valores en las columnas “Cuentas Fondo ROI 1”, “Cuentas Fondo ROI 2” y “Cuentas Fondo ROI 3”, como también el tiempo vivo de conteo en la columna “Tiempo conteo fondo (s)” de la sección 2. Mediciones calibración equipo y caracterización del fondo del formato AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA.</p>
5	Registro de los datos del trabajador	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>Si es la primera vez que se mide el trabajador, se crea el registro en la sección 1. Datos del trabajador del formato “AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA”. Se registran los siguientes datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Nombres y Apellidos ○ Fecha de nacimiento ○ Número de identificación ○ Fecha de ingreso al servicio ○ Edad ○ Género ○ Si el TOE en otra institución ○ Si Fuma o Bebe licor ○ Equipo de medición. <p>Si ya está registrado previamente se procede a solicitar en documentación de radiofarmacia el formato diligenciado.</p> <p>NOTA: Se le informa al trabajador que la medida durará 20 minutos.</p>
6	Ubicación de la sonda para medida del trabajador y registro de fecha y hora de medida	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>Se le indica al trabajador que debe sentarse, luego, se ubica al final de la sonda de tal forma el cuello quede ubicado a 1 cm del final del protector del detector, el punto medio del detector deberá ubicarse encima de la Horquilla Externa del trabajador a evaluar. Se registra la fecha y hora de inicio de medición del trabajador en las columnas “Fecha de medición trabajador” y “Hora de medición trabajador”, respectivamente, de la página 2 del formato “AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA”.</p>

	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE	CÓDIGO:	AOE-P04-D-06
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	02
	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PARA REALIZAR DOSIMETRÍA INTERNA A TRABAJADORES DE LA RADIOFARMACIA OCUPACIONALMENTE EXPUESTOS A I-131	VIGENCIA:	08-08-2016
			Página 3 de 5

7	Medición del trabajador	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>En la herramienta MCA (donde se encuentra actualmente), se configura el tiempo vivo de medida a 1200 s (<i>live time</i> en <i>counting setup</i> de opción MCA), manteniendo la configuración de las ROI's del paso 3. Se inicia el conteo dando click en <i>Start</i>. Se registra el número de cuentas, cuya cantidad se observa en la casilla <i>Integral</i>, en la columna "Cuentas ROI 1 TOE" se registra el número de cuentas del ROI 1, en la columna "Cuentas ROI 2 TOE" se registra el número de cuentas del ROI 2 y en la columna "Cuentas ROI 3 TOE" se registra el número de cuentas del ROI 3, el tiempo vivo de conteo en la columna "Tiempo conteo TOE (s)" del formato "AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA".</p>
8	Cálculo de la actividad	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>Se calcula el número de cuentas netas para cada ROI ($C_{ROI-netas}$) de la siguiente manera:</p> $C_{ROI-i-net} = C_{ROI-i} - C_{fondo-i} \cdot \left(\frac{t_{ROI-i}}{t_{fondo-i}} \right)$ <p>Donde C_{ROI-i} son las cuentas en el ROI respectivo con tiempo de conteo t_{ROI-i}, y $C_{fondo-i}$ son las cuentas de fondo con tiempo de conteo $t_{fondo-i}$.</p> <p>El cálculo de la actividad A se realiza de acuerdo a la ecuación:</p> $A(Bq) = \frac{1}{E_{I-131}} \left(\frac{C_{ROI-2-net} - C_{ROI-1-net} - C_{ROI-3-net}}{t_{ROI-2}} \right)$ <p>Donde E_{I-131} es el valor de la eficiencia del detector para I-131, $C_{ROI-2-net}$ son las cuentas netas medidas en la ROI 2, $C_{ROI-1-net}$ son las cuentas netas medidas en la ROI 1, $C_{ROI-3-net}$ son las cuentas netas medidas en la ROI 3, t_{ROI-2} es el tiempo de conteo del TOE en el ROI 2 el cual es equivalente al del ROI 1 y al del ROI 3.</p>

	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE	CÓDIGO:	AOE-P04-D-06
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	02
	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PARA REALIZAR DOSIMETRÍA INTERNA A TRABAJADORES DE LA RADIOFARMACIA OCUPACIONALMENTE EXPUESTOS A I-131	VIGENCIA:	08-08-2016
			Página 4 de 5

9	Registro de la actividad mostrada en la medida	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>Registrar el valor de actividad obtenido en la columna "Actividad medida (Bq)" en el formato "AOE-P04-F-64 REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA", teniendo en cuenta lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si el valor de actividad calculada es inferior al nivel derivado de registro (NDR=360 Bq) se escribe "A< NDR". • Si el valor es superior al nivel derivado de registro se registra la cantidad calculada en la columna Actividad medida (Bq) y se procede con el paso 10. 																
10	Valoración de actividad incorporada con modelos estandarizados y evaluación de dosis efectiva comprometida	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>En el caso en que el valor de la actividad medida supere el NDR pero esté por debajo del Nivel Derivado de Investigación (NDI) se recurrirán a modelos estandarizados para calcular la incorporación a través de la ecuación</p> $I(\text{Bq}) = \frac{A}{m(t)}$ <p>Donde los valores de $m(t)$ son publicados por el IAEA en el Safety Reports Series No.37 y por el ICRP en el Reporte 78, se han tomado los valores por incorporación por inhalación para partículas de 5µm de I-131. (Ver Tabla 1). La variable t representa el tiempo transcurrido desde la manipulación que produjo la incorporación.</p> <p><i>Tabla 1 Valores de $m(t)$ para I-131 por inhalación de vapor</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>t (día)</th> <th>$m(t)$ en tiroides</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2.3E-01</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2.2E-01</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2.0E-01</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1.9E-01</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1.7E-01</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>1.5E-01</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1.4E-01</td> </tr> </tbody> </table> <p>La dosis efectiva comprometida E(50) se calculará multiplicando el valor de I(Bq) por el coeficiente de dosis efectiva $e(g)=1.1 \times 10^{-8}\text{Sv/Bq}$, con fines de registro se expresará en mSv y se registrarán en el formato "AOE-P04-F-65 REGISTRO DE DOSIS EFECTIVA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA".</p>	t (día)	$m(t)$ en tiroides	1	2.3E-01	2	2.2E-01	3	2.0E-01	4	1.9E-01	5	1.7E-01	6	1.5E-01	7	1.4E-01
t (día)	$m(t)$ en tiroides																		
1	2.3E-01																		
2	2.2E-01																		
3	2.0E-01																		
4	1.9E-01																		
5	1.7E-01																		
6	1.5E-01																		
7	1.4E-01																		

	INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE	CÓDIGO:	AOE-P04-D-06
	ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	VERSIÓN:	02
	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PARA REALIZAR DOSIMETRÍA INTERNA A TRABAJADORES DE LA RADIOFARMACIA OCUPACIONALMENTE EXPUESTOS A I-131	VIGENCIA:	08-08-2016
			Página 5 de 5

11	Comparación con el nivel derivado de investigación	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	Si el valor de actividad calculada supera el nivel de investigación se hace necesario evaluar las condiciones bajo las cuales surgió la incorporación, como también las condiciones de protección radiológica en que se manipula el I-131. El OPR o el Físico de Medicina Nuclear realizarán mediciones durante los días siguientes a la incorporación para evaluar con certeza el día de la incorporación. Se aplicará la metodología de dosimetría interna de pacientes con el fin de realizar la evaluación personalizada al trabajador.
12	Registro de la dosis efectiva comprometida en historial dosimétrico del trabajador y evaluación de dosis efectiva	Físico Médico / Profesional encargado de la protección radiológica / Oficial de Protección Radiológica	<p>Se realizará el registro de las dosis efectivas comprometidas debidas a incorporaciones incidentales o crónicas. Serán registradas en el formato "AOE-P04-F-65 REGISTRO DE DOSIS EFECTIVA PARA TRABAJADORES DE LA RADIOFARMACIA", las cuales serán adjuntadas a los reportes dosimétricos de los trabajadores.</p> <p>La dosis efectiva será calculada por medio de la ecuación:</p> $D = H_p(10) + E(50)$ <p>Donde $H_p(10)$ representa la dosis debida a exposición externa que se obtiene de los reportes de dosimetría expedidos por Dosimetrix.</p> <p>En el formato "AOE-P04-F-65 REGISTRO DE DOSIS EFECTIVA PARA TRABAJADORES DE LA RADIOFARMACIA" se realiza la evaluación del valor acumulado anual.</p>

"TODA VERSIÓN IMPRESA DE ESTE DOCUMENTO SE CONSIDERA DOCUMENTO NO CONTROLADO"

ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Cargo:	Oficial de Protección Radiológica	Cargo	Coordinador	Cargo	Subdirector
Dependencia:	Subdirección Atención Médica y Docencia	Dependencia	Radiofarmacia	Dependencia	Subdirección Atención Médica y Docencia
Fecha:	03-12-2015	Fecha	18-12-2015	Fecha	03-02-2016

**8. Implementación del programa de
vigilancia radiológica, para trabajadores
en radiofarmacia.**

Implementación del programa de vigilancia radiológica, para trabajadores en radiofarmacia.

Sánchez, M.¹, Arciniegas, M.² y Veloza, S.³

¹ Estudiante Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Física Médica.

² Físico Médico. Instituto Nacional de Cancerología. Oficial de Protección radiológica.

³ Docente Adscrita. Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Física Médica.

RESUMEN

Por medio del presente trabajo se pretende establecer la implementación de un programa de vigilancia radiológica en el área de radiofarmacia del instituto nacional de cancerología (Bogotá, Colombia). Con tal fin se propone adaptar las diferentes recomendaciones de organismos internacionales competentes en el tema. Contando con los niveles y condiciones de manipulación de I-131 se ha evaluado el factor decisión (criterio matemático que permite saber la pertinencia o no de la implementación de un programa de este tipo), de la misma manera se han establecido niveles de registro, de investigación y niveles derivados respectivamente a usar dentro del programa con base en los límites de dosis recomendados para los trabajadores ocupacionalmente expuestos al producirse incorporaciones dentro del organismo debido al manejo del mencionado radionúclido.

1. INTRODUCCIÓN

La protección radiológica individual busca reducir los posibles riesgos que se pueden presentar por el manejo de fuentes radiactivas en el sitio de trabajo, de esta manera y siguiendo las recomendaciones presentadas por el Organismo Internacional de Energía atómica [1] que debido al riesgo radiológico existen con la manipulación de I-131, de posibles incorporaciones en el organismo se hace necesario llevar un consolidado con base en los registros de las posibles estimaciones de incorporaciones sufridas medidas, evaluando su exposición ocupacional en vista a mejorar su práctica laboral o tomar restricciones en caso de que la medida de exposición interna sea considerable, para lo cual se debe sistematizar institucionalmente tanto las mediciones como los registros de datos de cada uno de los trabajadores que posiblemente sufran incorporaciones de este tipo por el manejo del radionúclido.

De la misma manera se debe tener en cuenta la pertinencia o no del diseño de un programa de vigilancia radiológico rutinario, con tal fin [2] propone un criterio matemático para conocer si necesariamente se debe llevar a cabo un programa de vigilancia radiológico individual, así como el seguimiento a las labores que son desempeñadas por las personas en directa manipulación de I-131 en la radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología INC, (Bogotá Colombia). A su vez la naturaleza, frecuencia y la precisión de la vigilancia radiológica individual deberán determinarse de acuerdo a la magnitud y a las posibles fluctuaciones de los niveles de exposición, así como a la probabilidad y magnitud de los

¹ E-mail del Autor. mjsanchezb@unal.edu.co

riesgos potenciales, por esta razón debe hacerse una caracterización del lugar de trabajo así como el establecimiento de un rango determinado en el método de medición empleado pueda garantizar que existe una cantidad mínima significativa (AMS) que puede ser capaz de detectar una incorporación.

La Planificación, dirección y aplicación de un programa de vigilancia radiológica en dosimetría interna se encuentra a cargo del profesional especializado (Físico Médico de Medicina Nuclear y Oficial de Protección Radiológica); tiene como objetivo determinar una estimación de la posible contaminación interna de los trabajadores que manipulen I-131, en el área de radiofarmacia, puesto que existe en su estado particulado y/o volátil el riesgo de la incorporación en el organismo vía aérea (incorporación por inhalación), a su vez generar un consolidado dosimétrico interno donde se lleve una estadística de incorporaciones causadas en el área de trabajo con el fin de conocer la dosis total (interna y externa), que el trabajador alcanza al realizar sus labores para realizar el estimado de dosis individual.

2. FACTOR DECISIÓN

El OIEA [2] propone un criterio matemático para conocer si existe la necesidad o no de implementar un monitoreo para los trabajadores que manipulan el I-131, en el cual se valoran las condiciones de trabajo y manipulación del radionúclido; de esta manera la medida de protección empleada en la manipulación (f_{hs}), la forma físico-química que tenga (f_{fs}), el factor de protección que hace referencia a el equipo protector que se tenga en el laboratorio (f_{ps}), la actividad total manipulada al año (A_j) que se encuentra relacionada con la cantidad manipulada y el valor de la dosis efectiva comprometida $e(g)$ por unidad de incorporación hacen parte de los valores para determinar si es necesario implementar o no un programa de dicha categoría [Ec.1].

$$d_j = \frac{A_j f_{fs} f_{hs} f_{ps} e(g)}{0.001} \quad [1]$$

Si el valor dado por el factor decisión es mayor a 1mSv se considera que los trabajadores pueden sufrir incorporaciones mayores a las del nivel del público y por tal razón debe llevarse a cabo un sistema de vigilancia radiológica individual. Para el caso específico de las instalaciones de radiofarmacia en el INC con un (f_{hs}) del valor 10, operaciones de manejo en caja de guantes (f_{ps}) que tiene un valor de 0.01, un factor de forma físico-química (f_{fs}) 0.01 un valor de $e(g)$ correspondiente a la forma de incorporación de radionúclidos que se obtiene de acuerdo a las siguientes rutas de manipulación: Inhalación de partículas radiactivas que están suspendidas en el aire, ingestión, inyección o adsorción. Para este caso particular en el cual se estudia la situación de manejo presentada en la radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología E.S.E, se encuentra que la forma más conocida en las rutinas de trabajo de los trabajadores que manipulen material radiactivo para una posible incorporación es por inhalación de partículas suspendidas en el aire y una actividad anual de se tendría un valor respectivamente de $e(g) = 2 \times 10^{-8} \frac{Sv}{Bq}$ y una actividad anual de 14,4 Ci o 532.8 GBq con tal caracterización del lugar de trabajo el valor del factor decisión sería de 10656 Sv/año, lo cual implica que se debe llevar a cabo un programa de vigilancia radiológica individual.

3. ESTABLECIMIENTO DE LOS NIVELES DE DOSIS INCORPORADAS

Dentro del programa de vigilancia radiológica individual es necesario tener en cuenta las magnitudes dosimétricas para la vigilancia de los resultados de las mediciones establecidas, ya que estas expresan los límites de dosis en este caso a un determinado órgano como lo es la glándula tiroidea, de esta manera [1] propone la manera en que los niveles orientativos deben darse de acuerdo a los límites permisibles recomendados de dosis.

3.1 Establecimiento de los Niveles de registro y de investigación

3.1.1 Nivel de registro: Está definido como el nivel de dosis, exposición o incorporación especificado por la autoridad reguladora en o sobre cuyos valores de dosis, exposición o incorporación recibidos por los trabajadores serán ingresados a los registros de exposición individual. Teniendo en cuenta la publicación del OIEA es sugerible tomar el nivel de registro para que corresponda a una dosis efectiva comprometida de 1 mSv, pero dadas las condiciones de medición en el Instituto Nacional de Cancerología y las restricciones existentes en los métodos de medición directos que se implementaron para obtener los resultados de las actividades incorporadas se propone que si se está tratando con trabajadores ocupacionalmente expuestos como lo son en el caso del área de radiofarmacia, este nivel de registro sea 1/10 del límite de dosis para personal expuesto es decir **2 mSv**.

De tal forma que para N periodos de medición en el año, el nivel de registro por incorporación de un radionucleido j en un periodo de monitoreo debería estar dado por [Ec.2]:

$$NR = \frac{0.002}{N \cdot e_j(g)} \quad [2]$$

En el caso de I-131 por inhalación, con el respectivo valor del coeficiente de dosis efectiva para un periodo de evaluación de 52 semanas se tendrá un nivel de registro de **1923 Bq**.

3.1.2 Nivel de investigación: Se define como el valor de una magnitud tal como la dosis efectiva, la incorporación o la contaminación por unidad de área o volumen que al alcanzarse debería realizarse una investigación de las condiciones de operación del material radiactivo. Es escogido sobre la base de una dosis efectiva comprometida de **5 mSv** [Ec.3]:

$$NI = \frac{0.005}{N \cdot e_j(g)} \quad [3]$$

En el caso de I-131 por inhalación con su respectivo valor del coeficiente de dosis efectiva, para un periodo de evaluación de **52 semanas** se tendrá un nivel de investigación de **4800 Bq**.

3.1.3 Niveles derivados de investigación. (NID): Son los resultados de las medidas que implican incorporaciones de radionúclidos o dosis efectivas comprometidas en los correspondientes niveles de investigación sobre los cuales debe ejercerse una medida correctiva a las labores de manipulación [Ec.4].

$$\mathbf{NDI = NI \times m(t_0) = \frac{0.005}{N \cdot e_j(g)} \times m(t_0)} \quad [4]$$

Donde t_0 es el tiempo estimado en el que pudo haber ocurrido la incorporación, se calcula como $t_0 = 365/2N$.

En el caso de I-131 por inhalación, se tendría un **NDI = 912 Bq** que representaría el valor de la medida a partir de la cual se realiza una investigación.

3.1.4 Niveles derivados de registro (NDR): Son los resultados de las medidas que implican incorporaciones de radionúclidos o dosis efectivas comprometidas en los correspondientes niveles registro que se consolidarán en el historial dosimétrico del trabajador [Ec.5].

$$\mathbf{NDR = NR \times m(t_0) = \frac{0.002}{N \cdot e_j(g)} \times m(t_0)} \quad [5]$$

En el caso de I-131 se tendría un **NDR = 365 Bq** que representaría el valor de la medida a partir de la cual se hace el registro respectivo.

3.2 Establecimiento de la AMD

Con base en el nivel derivado de registro es necesario determinar el valor de la actividad mínima detectable para que las medidas se encuentren de acorde al orden de magnitud esta cantidad, así, se tiene como condicionamiento que $AMD < NDR$, por lo que a nivel experimental se realizarán las debidas mediciones para hallar el tiempo de medida para I-131 que permita satisfacer la condición, el resultado del tiempo de conteo para satisfacer esa condición es de 20 minutos, para un valor de AMD de aproximadamente

4. Establecimiento de la frecuencia del programa de vigilancia de incorporación.

Para que se satisfaga la condición de que la incertidumbre en el valor de la incorporación, debido al desconocimiento del tiempo de incorporación sea menor que un factor de 2, se recurre a las tablas de los valores de $m(t)$ comparando que los valores entre el día 1 y el día propuesto de intervalo no varíe en un factor de más de dicho factor. Así, observando la tabla del Anexo III del documento [2], se observa que la división entre el valor $m(1)$ y $m(9)$ no supera el factor de 2.

Comparando lo anterior con respecto a lo afirmado por el ICRP, que establece un factor máximo de 3, se satisface entre el día 10 y 20 cuya información intermedia no está disponible.

Con base en lo anterior y dadas las condiciones de manejo del material, se ha decidido que la frecuencia de las mediciones en tiroides del personal ocupacionalmente expuesto de la radiofarmacia sea semanal los días miércoles. De esta manera las personas que intervinieron en la manipulación del I-131 serán trasladadas a un sitio aislado con bajo fondo de radiación, donde permanecerán sentadas aproximadamente 20 min con el detector calibrado apuntando hacia la glándula tiroidea.

4.1 Formatos institucionales del registro de la medida

A continuación a manera de resultado se presentan los formatos institucionales en los cuales se hará el registro de las mediciones obtenidas tanto para su registro dosimétrico consolidado Figura 1, como para los datos de las actividades incorporadas obtenidas por espectroscopia gamma en los ROI respectivos de medida para el I-131.

INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE								CÓDIGO:		
ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA								VERSIÓN: 1		
REGISTRO DE DOSIS EFECTIVA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA								VIGENCIA:		
								Página 1 de 1		
1. Datos del trabajador										
Nombres	Apellidos	Fecha de nacimiento (DD/MM/AA)	Número de identificación	Fecha de ingreso al servicio	Se ha sometido a pruebas diagnósticas con I-131	Edad	Género	TOE en otra institución	Fuma o bebe licor	Equipo de medición
2. Valoración de dosis efectiva										
Fecha (DD/MM/AA)	Incorporación (Ba)	Dosis efectiva comprometida E(50) (mSv)	Dosis efectiva H ₁₀ (10) (mSv)	Dosis efectiva (mSv)						
Acumulado anual (mSv)										

Figura 1: Consolidado dosimétrico del trabajador ocupacionalmente expuesto del área de radiofarmacia.

INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE								CÓDIGO:	
ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA								VERSIÓN: 1	
REGISTRO MEDIDAS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA TRABAJADORES RADIOFARMACIA								VIGENCIA:	
								Página 1 de 1	
1. Datos del trabajador									
Nombres	Apellidos	Fecha de nacimiento (DD/MM/AA)	Número de identificación	Fecha de ingreso al servicio	Edad	Género	TOE en otra institución	Fuma o bebe licor	Equipo de medición
2. Mediciones calibración equipo y caracterización del fondo									
Fecha de calibración	Hora de calibración	Calibración fuente (Bq/%)	Eficiencia del detector I-131 (%)	Cuentas fondo ROI 1	Cuentas fondo ROI 2	Cuentas fondo ROI 3	Tiempo conteo (s) fondo	Firma responsable de la medición	

Figura 2: Consolidado Mediciones actividad incorporada en el trabajador.

4.2 Acciones a tener en cuenta en el registro de las medidas:

Teniendo en cuenta las restricciones dadas por la medición de la actividad incorporada y los niveles derivados se debe tener en cuenta que tipo de acciones deben tomarse en los tres casos que pueden ocurrir, bien sea que la medida sea menor que el nivel de registro, que esta se encuentre entre el nivel de registro y el de investigación o en el caso de que llegara a

superarse el nivel de investigación. En la figura 3 se presenta en un esquema las acciones a seguir en cada una de estas tres situaciones dada la medición de la actividad en el trabajador:

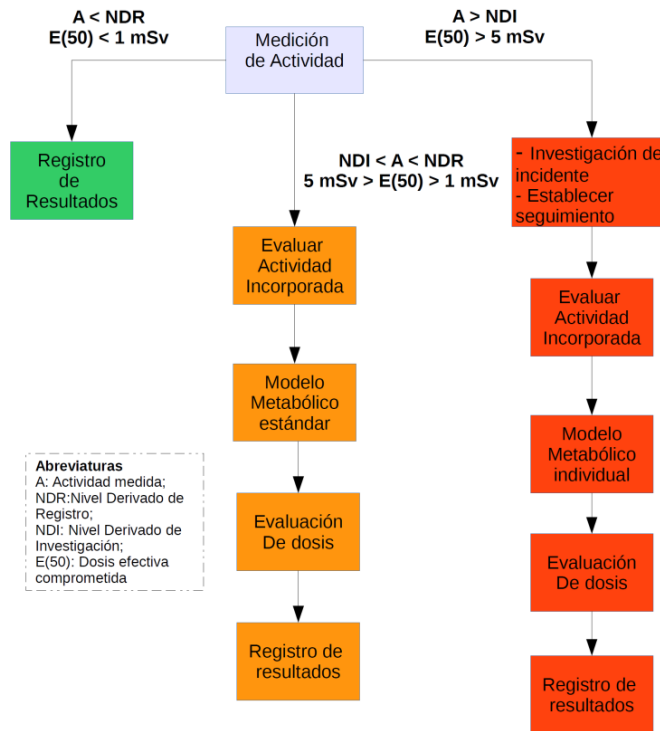


Figura 3: Acciones a tomarse una vez evaluada la medición de la actividad.

5. CONCLUSIONES

Debido a la cantidad y condiciones de manipulación de I-131 de acuerdo al factor decisión de 10656 Sv/año, se debe contar con el establecimiento de un programa de vigilancia radiológica que contenga el programa de dosimetría interna para los trabajadores. Se ha realizado la institucionalización del programa elaborando los diferentes procedimientos a ejecutar dentro del programa, incluyendo las acciones en caso de actividades incorporadas elevadas así como los formatos institucionales manejados de acuerdo a las recomendaciones del OIEA.

Se debe tener en cuenta la metodología, frecuencia e incertidumbre del método de medición empleado ya que de este depende que se pueda poner un valor adecuado de nivel de registro para consolidar las medias en el historial dosimétrico del trabajador.

6. REFERENCIAS

1. Organismo Internacional de Energía atómica., Evaluación de la exposición ocupacional debida a incorporaciones de radionucleidos. RGS1.2. Guía de seguridad. STI/PUB/1077 (ISBN:92-0-306704-3) 91 pp.2004
2. International atomic Agency Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards INTERIM EDITION. IAEA Safety Standards.2001.

3. Organismo Internacional de Energía atómica (OIEA). Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards, Agosto 2014.
4. Ministerio de Minas y Energía Colombia. Resolución 90874 de 2014 (Agosto 11), 2014.
5. Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Limits for intakes of radionuclides by workers, 1979.
6. Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Individual monitoring for intakes of radionuclides by workers, 1989.
7. Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Individual monitoring for internal exposure of workers., 1997.
8. James B. Stubbs Michael G. Stabin Marguerite T. Hays Kenneth F. Koral James S. Robertson Roger W. Howell Barry W. Wessels Darrell R. Fisher David A. Weber Jeffrey A. Siegel, Stephen R. Thomas and A. Bertrand Brill. MIRD pamphlet no.16: Techniques for quantitative radiopharmaceutical biodistribution data acquisition and analysis for use in human radiation dose estimates, 1999.
9. Anselmo Puerta. Informe de reunión de expertos, Buenos Aires. arg-13000, arcallxxviii, 2006

9. Calibración equipo para dosimetría internade trabajadores ocupacionales de Radiofarmacia

CALIBRACIÓN EQUIPO PARA DOSIMETRÍA INTERNA DE TRABAJADORES OCUPACIONALES DE RADIOFARMACIA

Arciniegas-Alvarez, M.A.¹, Agulles L.², Sanchez, M.²

¹ Instituto Nacional de Cancerología E.S.E.,

² Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN

Por medio del presente trabajo se busca establecer una metodología de calibración cruzada usando una fuente de Ba-133 para un detector de NaI(Ta), usado para la medición de captación tiroidea de I-131 en el proceso de dosimetría interna de trabajadores ocupacionalmente expuestos, en el cual la medición de la mínima actividad detectable por el mismo sea acorde al nivel de registro, garantizando que esta medición se encuentre dentro de un rango de certidumbre adecuado. Con tal fin se quiere establecer un protocolo de calibración cruzada antes de la medición con los trabajadores, empleando a su vez un simulador físico certificado por el OIEA para tiroides, así como algunas correcciones pertinentes dados los problemas existentes de retrodispersión, para consolidar y analizar los datos hallados en los trabajadores de una manera adecuada en el registro dosimétrico individual a través de una medición directa. A su vez se estableció un procedimiento que permite seleccionar la ROI donde los espectros de Ba-133 y I-131 tengan la misma eficiencia y la obtención de la mínima actividad detectable adecuada para satisfacer un nivel de registro que conduce a dosis efectivas comprometidas de 2 mSv en tiempos aproximados de conteo de 20 min.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la existencia y conformación de un programa de vigilancia radiológica individual debe existir una normalización de un método de detección de la actividad incorporada; en este caso en particular se opta por un método directo de medición como lo es la espectrometría gamma. Estas medidas deben tener en cuenta una serie de verificaciones que puedan asegurar un método de ensayo apropiado para el propósito establecido y permitir evaluar con un grado de certeza la medición de actividad incorporada que estimará la dosis efectiva comprometida a través de la incorporación en tiroides debido al riesgo de exposición por inhalación tras la manipulación del I-131 [1,2].

Posterior a la toma de las mediciones por medio de un modelo estandarizado, la evaluación de las mismas y la correcta interpretación de los resultados; así mismo, la frecuencia y la precisión del programa de vigilancia radiológica individual deben determinarse de acuerdo a las condiciones fluctuantes en las variadas labores desempeñadas, así como los cambios en las posibles incorporaciones sufridas en el tiempo de medición, teniendo en cuenta las características implícitas de incertidumbre en el equipo empleado y en la medición de los

¹ E-mail: marciniegas@cancer.gov.co

trabajadores. Por lo anterior, es necesario definir paso a paso los procedimientos desarrollados para el cálculo de los límites de detección en los métodos de adquisición de las posibles incorporaciones medidas con el equipo.

Al emplear y establecer un sistema de calibración cruzada para el detector usado en las mediciones directas de las actividades incorporadas sobre tiroides, se debe poder garantizar que la medida de esta se encuentre dentro de un rango adecuado de certidumbre por medio de patrones de medida conocidos y de la implementación de correcciones a la misma. En los casos que usan un detector inorgánico se debe tener en cuenta que la resolución energética es limitada y que inclusive al darle tratamiento a estos espectros complejos por medio de métodos de deconvolución no se puede determinar completamente que la medida sea completamente fiable [3].

En este trabajo se presenta la descripción del equipo y la metodología para realizar la calibración con el fin de cuantificar la cantidad de actividad incorporada de I-131 para trabajadores de la radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología E.S.E.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS RECURSOS USADOS

Para realizar cuantificación de incorporación de actividad de I-131, El Instituto Nacional de Cancerología E.S.E. cuenta con un equipo “Gamma-Sonda” Captus 3000, del fabricante Capintec Inc., la cual cuenta con las especificaciones técnicas presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificación técnica del equipo usado para cuantificación de incorporaciones de actividad de I-131

Componente	Tamaño
Serial	900604
Detector	NaI (Tl)
Tamaño detector	5.1 x 5.1 cm
Resolución	8%o mejor para Cs-137
Colimador	cumple con estándar ANSI N44.3-1973
Canales de la interfaz	1024 canales
Máxima tasa de conteo	100000 cps

Adicionalmente se cuenta con fuentes tipo lápiz de Cs-137 y Eu-152 con el fin de realizar la calibración del detector en energía, linealidad y constancia. También se cuenta con una fuente de Ba-133 tipo gotero de actividad inicial 244 μ Ci al 01/04/2007 y con un maniquí de captación tiroidea Marca BIODEx el cual es propuesto por el Organismo Internacional de Energía Atómica (ver Figura 1).



Figura 1. Maniquí para calibración de sonda del equipo Captus 3000

3. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

En la metodología de calibración del equipo se usan los elementos mencionados en la sección 2.

El cálculo estimado de la dosis incorporada se encuentra sustentado en diferentes modelos biocinéticos propuestos para una estimación de la dosis que puede incorporarse en situaciones de manejo del I-131, con tal finalidad se pretende realizar una vigilancia rutinaria encaminada a tomar mediciones al principal órgano involucrado en la captación de material particulado de I-131 como lo es la glándula tiroidea. Las medidas obtenidas son empleadas para calcular la incorporación de dicho radionúclido que conduce a calcular un estimativo de la dosis efectiva comprometida. El registro dosimétrico de cada uno de los trabajadores medidos se registra en el formato especial y adicionalmente el consolidado de las mediciones mensuales junto con la dosis debida a exposición externa conduce a la estimación de dosis efectiva anual también se consolida por escrito.

Las medidas de los conteos relacionados con la caracterización del fondo y de eficiencia de la fuente de Ba-133, también forman parte de los formatos institucionales como parte del seguimiento a las condiciones variables que se pueden presentar tanto en el área donde se toma la posible actividad manejada en el trabajador, como las condiciones intrínsecas del detector.

El tipo de monitoreo operacional empleado para los trabajadores encargados de la directa manipulación es de tipo semanal, puesto que las operaciones de recepción y encapsulamiento de las dosis se pueden realizar hasta 2 veces por semana en las instalaciones bajo operación en caja de guantes; a su vez para que se satisfaga la condición de que la incertidumbre en el valor de la incorporación [2].

3.1. Calibración en energía

A continuación se mostrarán los pasos seguidos para la calibración del equipo así como para la calibración cruzada usando la fuente de Ba-133

1. Ubique la fuente tipo lápiz de Cs-137 (actividad de 1.007 μCi medida el 1 de Marzo de 2011) dentro de la sonda del equipo Captus 3000 que se ha posicionado verticalmente (ver Figura 2) de tal forma que la parte activa (parte negra) quede en contacto con la superficie del detector.
2. Se realizan la configuración del software que permite una autocalibración en energía del detector.

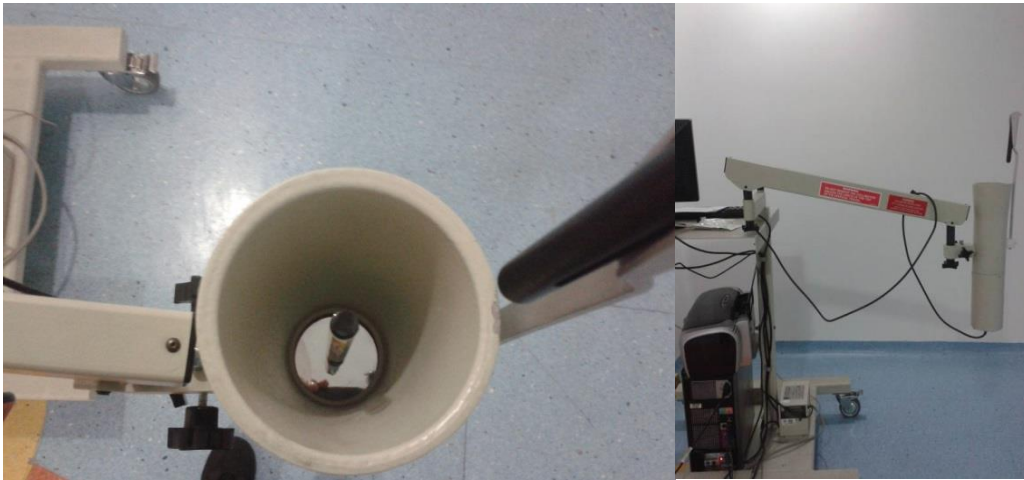


Figura 2. Ubicación de la fuente de calibración de Cs-137 y Eu-152 para la calibración en energía, linealidad y prueba de constancia de la sonda del equipo Captus 3000

3. La medición durará alrededor de 60 segundos. Cuando este proceso se pone en marcha el espectro aparece en cuentas por canal y se extraen los datos del pico de alta y baja energía en su respectivo canal, la ganancia, el umbral (threshold) y el ancho a la mitad de la altura máxima (FWHM).
4. La última línea contiene la FWHM del pico, esta deberá ser menor a 8%, valor que puede incrementarse hasta un 11% dependiendo del tiempo de vida del detector.

3.2. Calibración en linealidad

La prueba de linealidad para la sonda es realizada posterior a la culminación de la prueba de calibración en energía. La fuente de Eu-152 se introduce dentro de la sonda del mismo modo que la fuente para calibración de energía, una vez ubicada la fuente se continúan el proceso

de autocalibración. La medición durará alrededor de 150 segundos. El objetivo de esta prueba es verificar que la respuesta del equipo es lineal y es ajustada a 2 keV/canal.

3.3. Constancia

La prueba de constancia para la sonda es realizada posterior a la culminación de la prueba de linealidad, para lo cual se ubica la fuente de Cs-137 tipo lápiz usada en la prueba de calibración de energía dentro de la sonda del equipo Captus 3000, de manera idéntica a como se realizó en la prueba de calibración de energía. La prueba de constancia compara la actividad medida con la actividad calculada por decaimiento, cuya discrepancia debe ser de $\pm 10\%$.

3.4. Medición del factor de calibración para I-131 con Ba-133 para la geometría en dosimetría interna

En el software se configura para el registro de cuentas en el rango del espectro (0 a 2048 keV) usando el analizador multicanal. Se selecciona una región de interés (ROI) en el rango de 242 keV a 435 keV. Se realiza la medición del fondo en esta ROI durante 60 s.

Luego se ubica el maniquí BIODIX (Ver Figura 1) a una distancia de 1 cm del extremo de la cubierta del detector (ver Figura 3), con el fin de reproducir las condiciones geométricas de medida, ubicando previamente la fuente de Ba-133 dentro del maniquí a la cual se debe retirar la tapa para un ajuste adecuado. Dentro de la ROI seleccionada se encuentran 4 picos de energía del Ba-133, el de 276 keV con una emisividad de 0.0716; el de 302.8 keV con una emisividad de 0.1834; el de 356 keV con una emisividad de 0.6205 y la de 383.8 keV con una emisividad de 0.0894 [3].



Figura 3. Esquema de ubicación del maniquí de cuello para medición de eficiencia

Con el fin de considerar la contribución de retrodispersión en el espectro, se aplica el método de las tres ventanas [4], el cual pretende realizar la corrección a la región de interés considerada. Para ello se escogen dos ventanas, una inferior y una superior a la ROI de un ancho en energía equivalente a la mitad del de la ROI (Ver Figura 4). En este caso, la ventana inferior tendría un intervalo de 96 keV por debajo de los 242 keV y de 96 keV por encima de los 435 keV. Estas ventanas deben ser configuradas en la herramienta MCA.

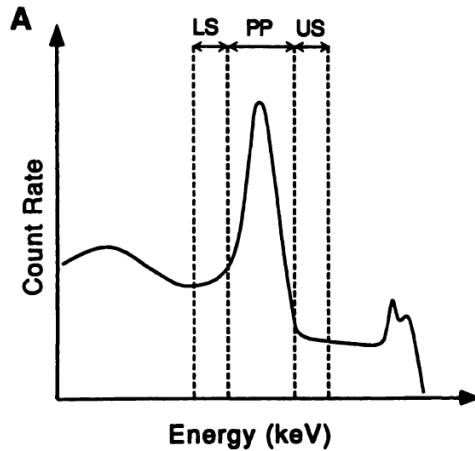


Figura 4. Esquema de selección de las ventanas en el método de triple ventana

Se realiza la corrección por retrodispersión para la ROI principal como se indica en la ecuación 1.

$$C_T = C_{ROI} - C_{VI} - C_{VS} \quad [1]$$

Donde C_{ROI} son las cuentas netas en la ROI, C_{VI} representa las cuentas netas en la ventana inferior y C_{VS} representa las cuentas netas en la ventana superior.

Se calcula la eficiencia del detector de NaI(Tl) para las emisiones en los picos de energía del Ba-133 como se indica en la ecuación 2.

$$E_{Ba-133} = \frac{C_T}{T(s) \cdot A(Bq) \cdot \sum Y_{Ba-133}} \quad [2]$$

donde T es el tiempo de conteo, A la actividad de la fuente, $\sum Y_{Ba-133}$ es la suma de la proporción de emisiones dentro de los picos considerados en la ROI y C_{neto} son las cuentas netas dentro de la ROI definida para los picos de energía del Ba-133 considerados, en el caso de la ROI de 242 a 435 keV se tiene que $\sum Y_{Ba-133} = 0.9649$.

Se define que la eficiencia equivalente de I-131 es aquella en la cual la tasa de conteo en la ROI es igual para ambos radionucleidos (Ba-133 y I-131), de modo que se cumple la expresión que se muestra en la ecuación 3.

$$E_{eqI-131} = E_{Ba-133} \frac{\sum Y_{I-131}}{\sum Y_{Ba-133}} \quad [3]$$

Siendo $\sum Y_i$ la sumatoria de las emisividades de los fotopicos comprendidos en la ROI del espectro de la fuente i .

La eficiencia equivalente de I-131 es un parámetro que permite determinar la actividad en los casos de conteo de I-131, de forma tal que para una tasa de conteo determinada de I-131 la actividad de I-131 se obtiene a través de la ecuación 5.

$$A_{I-131} = \frac{cps_{T_{I-131}}}{E_{eqI-131}} \quad [5]$$

De esta manera se permite conocer la actividad para I-131 en la ROI descrita anteriormente, en la geometría de calibración recomendada para dosimetría interna de los trabajadores.

3.5. Medición de la Actividad Mínima Detectable (AMD) para dosimetría interna

En el ROI de 242 a 435 keV se realiza la medición de fondo para la sonda. El valor de cuentas de fondo C_f y el tiempo de conteo T en segundos usan para calcular la AMD a través de la ecuación 6 [5] considerando la estadística de Currie.

$$AMD = \frac{4.65\sqrt{C_f} + 2.71}{T \cdot E} \quad [6]$$

En el caso de estudio, la AMD para tiempos de conteo de 20 min fue en promedio de 330 Bq. Esto indica una restricción para el nivel derivado de registro, ya que la dosis efectiva comprometida al que conduce el valor de la AMD obtenida es de 2 mSv.

4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN LOS TRABAJADORES

Al día siguiente de la manipulación de I-131, se le pide a los trabajadores que se despojen del uniforme utilizado en la radiofarmacia y se cubran con otro uniforme que se tenga conocimiento no está contaminado, de la misma manera que se retiren cadenas y gafas, así como en el caso de las mujeres que tengan el cabello recogido y no tengan maquillaje. Son pasados a la sala acondicionada donde se encuentra el equipo (ver Figura 5). En la sala no debe existir un fondo que sea considerable ya que eso afectaría el resultado de las mediciones, ni se deben tener las fuentes que fueron empleadas para la calibración del equipo ya que pueden afectar la respuesta del mismo. Se le informa al trabajador que la medición durara alrededor de 20 min, razón por la cual puede si lo desea recostarse en la silla en lo posible evitando moverse. La información es registrada en formato institucional mostrado en la Figura 6.

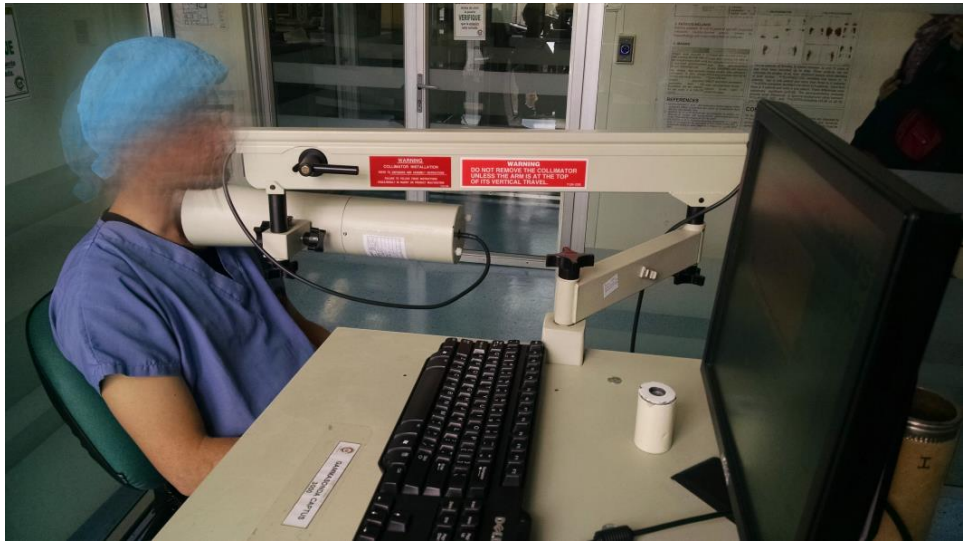


Figura 5. Posicionamiento trabajador para la toma de la medida.

 INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA ESE ATENCIÓN ONCOLÓGICA ESPECÍFICA	CÓDIGO:	
	VERSIÓN:	1
	VIGENCIA:	
	Página 1 de 1	

3. Mediciones TOE**

Fecha de medición TOE	Hora de medición TOE	Cuentas ROI 1* TOE	Cuentas ROI 2* TOE	Cuentas ROI 3* TOE	Tiempo de conteo TOE (s)	Cuentas netas ROI 1*	Cuentas netas ROI 2*	Cuentas netas ROI 3*	Actividad medida (Bq)	Firma trabajador	Firma Responsable de la medición

Figura 6. Formato de registro para medidas de dosimetría interna para trabajadores de Radiofarmacia

5. CONCLUSIONES

Debido a la importancia que tiene conocer con veracidad las medidas tomadas con el detector empleado en un programa de vigilancia radiológica individual es necesario garantizar que las mismas se encuentren dentro de un rango de certeza adecuado, para poder aproximar de la manera más eficaz la actividad incorporada en el trabajador; por esta razón procesos

rutinarios en la calibración del mismo son de gran relevancia para poder estimar correctamente los resultados de la medida.

Existe una limitación para el sistema de medición presentado en este trabajo con respecto a la actividad mínima detectable, puesto que para llegar a un nivel derivado de registro relacionado a una dosis efectiva comprometida de 1 mSv (nivel de público), los tiempos de conteo resultarían extremadamente largos y generarían incomodidad para la adquisición de los datos del trabajador.

4. REFERENCIAS

1. Organismo Internacional de Energía Atómica., Evaluación de la exposición ocupacional debida a incorporaciones de radionucleidos. RGS1.2. Guía de seguridad. STI/PUB/1077 (ISBN:92-0-306704-3) 91 pp.2004
2. Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Individual monitoring for intakes of radionuclides by workers, 1997.
3. Recomendaciones para la medición de I-131 en la tiroides humana usando un detector de NaI(Tl). Yepes N, Andrés. P, Rojo. A. VIII Congreso regional de Seguridad Nuclear, congreso latinoamericano del IRPA y el V congreso nacional de protección radiológica. Medellín Colombia 2010.
4. James B. Stubbs Michael G. Stabin Marguerite T. Hays Kenneth F. Koral James S. Robertson Roger W. Howell Barry W. Wessels Darrell R. Fisher David A. Weber Jeffrey A. Siegel, Stephen R. Thomas and A. Bertrand Brill. MIRD pamphlet no.16: Techniques for quantitative radiopharmaceutical biodistribution data acquisition and analysis for use in human radiation dose estimates, 1999.
5. Reporte No. 58 National Commission of Radiation Protection (NCRP Report No 58), A Handbook of Radioactivity Measurement Procedures, 1984