



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA

UNAN - MANAGUA

**RECINTO UNIVERSITARIO “RUBÉN DARÍO”  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**Trabajo Monográfico para Optar al Título de Licenciatura en Física con Mención  
en Física Médica.**

**Determinación de concentración derivada en aire (DAC) de  $^{131}\text{I}$  en el servicio de  
Medicina Nuclear del Centro Nacional de Radioterapia Nora Astorga durante el  
período abril 2019 – diciembre 2020.**

**AUTORES**

- Br. Acevedo Fitoria Maricielo Isabel.
- Br. Alvarado Aragón María Fernanda.

**TUTOR**

- Lic. Esp. Ricardo Enrique Pérez Zeledón

**Managua, Nicaragua**

**Enero del 2021**

## **Dedicatoria**

El presente trabajo monográfico se lo dedico principalmente a Dios, por permitirme culminar una de las etapas más importante de mi vida. A mis padres Alberto Acevedo y Martha Fitoria, por su amor, apoyo y sacrificio en todos estos años, por inculcarme desde pequeña la importancia del estudio, a mi hermano Jossue Fitoria, gracias a ellos he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

*Maricielo Isabel Acevedo Fitoria*

Dedico este trabajo monográfico a Dios por su infinita bondad, por darme la fortaleza para continuar cada día y permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. A mi madre Cristhel Aragón pues sin ella no lo habría logrado, por apoyarme en todo momento y jamás dejarme sola. A mi hermana, abuelos y tíos por estar conmigo en cada paso que doy, escuchándome y aconsejándome.

*María Fernanda Alvarado Aragón*

## **Agradecimientos**

Primeramente, gracias a Dios por darnos las fuerzas para luchar por este proyecto de vida, a nuestros padres por ser los principales promotores de nuestras metas, por habernos apoyado, motivado y creer en nuestras expectativas.

Al Lic. Esp. Ricardo Pérez por ser un excelente tutor, por habernos compartido sus conocimientos y guiarnos durante todo el desarrollo de la tesis al tomar parte de su tiempo para ofrecernos su ayuda. Al docente MSc. Jorge Flores por apoyarnos en el trayecto de nuestra formación académica.

Al personal del LAF-RAM y autoridades del Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga” por permitirnos realizar este tema de investigación y hacer uso de sus recursos.

## Carta Aval del tutor

Managua, Nicaragua  
14 de diciembre de 2020

Dr. Noel Zelaya  
Director  
Departamento de Física  
Facultad de Ciencias e Ingenierías  
UNAN, Managua

Estimado Dr. Zelaya

Por la presente hago llegar mi valoración como tutor de la monografía realizada por las Bachilleres **María Fernanda Alvarado Aragón** y **Maricielo Isabel Acevedo Fitoria**, la cual considero que el reglamento estudiantil vigente.

Este trabajo ha sido de gran aporte al Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF RAM) para poder dar apertura a un nuevo servicio a favor de la sociedad nicaragüense. El trabajo tiene como título “*Determinación de concentración derivada en aire (DAC) de  $^{131}\text{I}$  en el servicio de Medicina Nuclear del Centro Nacional de Radioterapia Nora Astorga durante el período abril 2019 – diciembre 2020*”

Agradecería de su gestión para la revisión del trabajo.

Sin más que agregar, aprovecho para enviarles mis fraternos saludos.

Atentamente



Lic. Esp. Ricardo Pérez Zeledón  
Tutor  
Docente Depto. Física / LAF - RAM  
Facultad de Ciencias e Ingenierías  
UNAN, Managua

## Resumen

El monitoreo en aire es fundamental para la protección radiológica del trabajador ocupacionalmente expuesto, en el área de medicina nuclear donde se trabaja con radionucleidos altamente volátil como es el yodo-131 ( $^{131}\text{I}$ ); por esta razón se realizó un monitoreo para evaluar la concentración derivada en aire (DAC) de este radionucleido, ya que la causa más común de incorporación de material radiactivo que reciben los trabajadores de medicina nuclear es por inhalación de  $^{131}\text{I}$ . Por recomendaciones de la OIEA esta concentración debería estar por debajo de  $416,67 \text{ Bq/m}^3$ .

Para determinar la DAC de yodo radiactivo se efectuó la calibración del sistema de detección CAPTUS 3000 y se utilizaron filtros de carbón activado, para cuantificar los valores obtenidos del monitoreo en las diferentes salas del servicio de medicina nuclear del Centro Nacional de Radioterapia "Nora Astorga". Se concluyó que las condiciones de trabajo son satisfactorias ya que en ningún punto de medición la concentración supera el límite recomendado.

**Palabras Claves:** Filtros de carbón activado, Monitoreo en aire, Concentración derivada en aire, Actividad.

# Índice

|  |    |
|--|----|
| I. Introducción.....   | 1  |
| II. Antecedentes .....   | 2  |
| III. Planteamiento del problema.....                                   | 5  |
| IV. Justificación .....  | 6  |
| V. Objetivos .....   | 7  |
| <i>Objetivo General</i> .....  | 7  |
| <i>Objetivos específicos</i> .....                                     | 7  |
| VI. Hipótesis.....   | 8  |
| VII. Marco Referencial .....   | 9  |
| 1. Medicina Nuclear .....  | 9  |
| 1.1. Descripción y clasificación de las salas de medicina nuclear..... | 9  |
| 1.2. Clasificación de las áreas .....                                  | 13 |
| 1.3. Señalización de las Áreas supervisadas y controladas .....        | 14 |
| 1.4. Radionucleidos más utilizados en medicina nuclear .....           | 14 |
| 2. Carbón Activado .....   | 16 |
| 2.1. Filtros de carbón activado.....                                   | 16 |
| 2.2. Adsorción y absorción del yodo radiactivo.....                    | 17 |
| 3. Monitoreo.....  | 17 |
| 3.1. Monitoreo de personal y de área.....                              | 17 |
| 3.2. Monitoreo Ambiental .....   | 19 |
| 4. Dosimetría Interna .....  | 19 |
| 4.1. Incorporación de los radionucleidos al organismo.....             | 20 |
| 4.2. Modelos biocinéticos .....  | 21 |
| 4.3. Contaminación interna .....                                       | 23 |
| 4.4. Límites de aplicación en dosimetría interna .....                 | 25 |
| 5. Vigilancia Radiológica .....  | 27 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.1.  | Vigilancia de la concentración en aire de sustancias radiactiva en el lugar de trabajo.....  | 27 |
| 5.2.  | Métodos directos e indirectos para la vigilancia radiológica.....  | 28 |
| 5.3.  | Detección de radiación .....   | 30 |
| 6.    | Monitoreo de la concentración derivada en aire (DAC).....  | 30 |
| 6.1.  | Términos básicos para el monitoreo del <sup>131</sup> I .....  | 31 |
| 6.2.  | Frecuencia del muestreo .....  | 31 |
| 6.3.  | Tipos de estudio del flujo del aire .....  | 32 |
| 7.    | Ubicación de los muestreadores para la colocación de áreas de contaminación del aire   | 33 |
| 7.1.  | Ubicación de muestreadores portátiles.....   | 33 |
| 7.2.  | Recolección de muestras .....  | 34 |
| 8.    | Espectrometría Gamma (EG) .....  | 35 |
| 8.1.  | Detector de Centelleo .....  | 36 |
| 8.2.  | Detector de Ioduro de Sodio.....   | 36 |
| 8.3.  | Factor de Calibración .....  | 36 |
| 8.4.  | Análisis Espectral .....   | 37 |
| VIII. | Diseño Metodológico .....  | 38 |
|       | Tipo de estudio.....   | 38 |
|       | Definición de las variables dependientes e independientes.....   | 39 |
|       | Métodos e instrumentos de recopilación de datos .....  | 40 |
| a.    | Calibración del sistema de detección CAPTUS 3000 para la geometría de los filtros de carbón activado utilizados para recolección de muestras. .... | 40 |
| b.    | Monitoreo en aire para la evaluación de la DAC de <sup>131</sup> I en medicina nuclear.  | 41 |
| IX.   | Análisis y discusión de resultados .....   | 46 |
| a.    | Calibración del sistema de yoduro de Sodio [NaI(TI)] .....   | 46 |
| b.    | Evaluación de la DAC de <sup>131</sup> I en el servicio de medicina nuclear.....   | 51 |
| X.    | Conclusiones .....   | 56 |
| XI.   | Recomendaciones .....  | 57 |

|  |    |
|--|----|
| <b>XII. Referencias Bibliográficas</b> .....   | 58 |
| <b>Anexo 1: Cronograma de actividades</b> .....  | 60 |
| <b>Anexo 2: Presupuesto</b> .....  | 61 |
| <b>Anexo 3: Instructivo técnico para llevar a cabo el monitoreo de aire de <sup>131</sup>I en servicios de medicina nuclear del país</b> ..... | 62 |
| <b>Análisis de los filtros:</b> .....  | 70 |
| <b>Cálculo de la Concentración derivada en aire (DAC):</b> .....   | 72 |
| <b>Anexo 4</b> .....   | 74 |
| <b>Anexo 5</b> .....   | 75 |



## Índice de ilustraciones

|  |    |
|--|----|
| <b>Ilustración 1:</b> Cámara Caliente del servicio de medicina nuclear del CNR. A: Castillos de plomo. B: Activímetro. Fuente: Propia.....   | 10 |
| <b>Ilustración 2:</b> Equipo de Gamma cámara, Nucline SPIRIT, del servicio de medicina nuclear del CNR. (A): Carro para colimadores. (B): Cabezal detector. Fuente: Propia.  | 11 |
| <b>Ilustración 3:</b> Distribución de espacios en la sala de Medicina Nuclear del Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga”. Fuente: Propia. ....   | 13 |
| <b>Ilustración 4:</b> Símbolos indicadores de áreas de trabajo. (Autoridad regulatoria Nuclear , 2000, pág. 79).....   | 14 |
| <b>Ilustración 5:</b> Decaimiento radiactivo del $^{99}\text{Mo}$ y $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . (Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México, 2010)..... | 15 |
| <b>Ilustración 6:</b> Desintegración del $^{131}\text{I}$ (Kays666).....   | 16 |
| <b>Ilustración 7:</b> Filtro de carbón activado fuente: propia.....  | 17 |
| <b>Ilustración 8:</b> Vías de incorporación, transferencia y excreción de la contaminación interna (Consejo de seguridad nuclear, 2013) .....  | 21 |
| <b>Ilustración 9:</b> Modelo biocinético para la Inhalación (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004, pág. 38).....   | 23 |
| <b>Ilustración 10:</b> Verificación de geometría de impregnación y espectro emitido por la fuente. ....  | 40 |
| <b>Ilustración 11:</b> Geometría de medición con una distancia fuente detector de 18 cm. ..  | 41 |
| <b>Ilustración 12:</b> Flujómetro del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM); A: Sin Filtro, B: Con Filtro. Fuente: Propia.....   | 41 |
| <b>Ilustración 13:</b> Medidor de Flujo Digital (DFM).....   | 62 |
| <b>Ilustración 14:</b> Posiciones del LED para cada unidad. ....   | 63 |
| <b>Ilustración 15:</b> “Y” y “N” que aparecen en la pantalla.....  | 65 |
| <b>Ilustración 16:</b> Ejemplo de tiempo establecido en 15 min.....  | 65 |
| <b>Ilustración 17:</b> “Y” y “N” que aparecen en la pantalla. ....   | 66 |
| <b>Ilustración 18:</b> Ejemplo de volumen establecido.....   | 66 |
| <b>Ilustración 19:</b> Ejemplo de frecuencia de almacenamiento a 1s.....   | 67 |
| <b>Ilustración 20:</b> “Y” y “N” que aparecen en la pantalla. ....   | 68 |
| <b>Ilustración 21:</b> Colocación del filtro en el flujómetro.....   | 69 |
| <b>Ilustración 22:</b> Canales utilizados.....   | 70 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Ilustración 23:</b> Tiempo real de conteo. ....  | 71 |
| <b>Ilustración 24:</b> Cuadro integral de cuentas fondo. ....   | 71 |
| <b>Ilustración 25:</b> Impregnación del filtro de referencia con $^{131}\text{I}$ para la calibración del sistema de detección CAPTUS 3000..... | 75 |

## Índice de tablas

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tabla #1. Definición de las variables .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>Tabla # 2. Valores iniciales del filtro de referencia .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>Tabla #3. Recolección de la muestra .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>Tabla #4. Análisis para calibración de los filtros.....</b>  | <b>45</b> |
| <b>Tabla #5. Cuentas obtenidas por el CAPTUS 3000 del filtro de referencia.....</b>   | <b>46</b> |
| <b>Tabla #6. Evaluación del factor de eficiencia.....</b>   | <b>47</b> |
| <b>Tabla #7. <i>Datos para el cálculo de la concentración derivada en aire de <sup>131</sup>I correspondiente al primer día de monitoreo.</i> .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>Tabla # 8. <i>Datos para el cálculo de la concentración derivada en aire de <sup>131</sup>I correspondiente al segundo día de monitoreo.</i> .....</b> | <b>52</b> |
| <b>Tabla #9. Coeficiente de variación de las cuentas correspondientes a la tabla #7..</b>   | <b>53</b> |
| <b>Tabla #10. Coeficiente de variación de las cuentas correspondientes a la tabla #8</b>  | <b>53</b> |
| <b>Tabla #11. Coeficientes de dosis para los radionucleidos seleccionados .....</b>   | <b>74</b> |
| <b>Tabla #12. Concentraciones derivadas en aire (DAC) para radionucleidos seleccionados. ....</b>   | <b>74</b> |

## **I. Introducción**

En las salas de medicina nuclear normalmente utilizan de dos a más radionucleidos ya sea para diagnóstico o de uso terapéutico, en los centros de medicina nuclear de la República de Nicaragua los radionucleidos más utilizados son el Tecnecio-99 metaestable ( $^{99m}\text{Tc}$ ) y el yodo-131 ( $^{131}\text{I}$ ) debido al tipo de patologías tratadas a nivel nacional en Medicina Nuclear. Sin embargo, el  $^{131}\text{I}$  puede ser peligroso debido a su alta capacidad de absorción (F) y solubilidad (SR-1) para los trabajadores ocupacionalmente expuestos, ya que se puede presentar como partícula de aerosol o como gas; por lo tanto, es necesario realizar un constante monitoreo en las salas de medicina nuclear.

La concentración derivada en aire (o por sus siglas en Ingles “DAC”) permite valorar la concentración suspendida en aire para un año laboral de un trabajador ocupacionalmente expuesto, la determinación de la DAC se lleva a cabo por medio de un monitoreo de aire utilizando un flujómetro al que se le coloca un filtro de carbón activado para la recolección de la muestra, luego se realiza la lectura con un equipo de espectrometría gamma (Captus 3000) que cuenta con la calibración pertinente asociada a la geometría adecuada para el filtro.

El valor de la DAC establecido por el organismo internacional de energía atómica (OIEA) para el  $^{131}\text{I}$  es de  $416,67 \text{ Bq/m}^3$ . Por tanto, este estudio tiene como finalidad validar procedimientos para determinar la DAC de  $^{131}\text{I}$  en centros de medicina nuclear y de esta manera evaluar si hay alguna contaminación en el aire comprobando si está o no bajo el límite establecido.

## II. Antecedentes

En 1978 en el laboratorio de medicina nuclear del hospital Monongahela Valley se realizó un estudio de la concentración de aire de  $^{131}\text{I}$  con el objetivo de medir la radiactividad en el aire durante el manejo de cantidades de milicurie (mCi) de  $^{131}\text{I}$  en forma de líquido y cápsula. La actividad en el aire se midió contando el filtro de una muestra de contaminación del aire. Este dispositivo es una bomba de vacío accionada por motor con ajustable calibre para medir el flujo de aire. El aire es atraído a través de un filtro de celulosa impregnado de carbono 10 cm de diámetro y 2 mm de espesor. Los datos indicaron que hay una actividad significativa en el aire cuando las botellas que contienen 100 a 145 mCi de líquido  $^{131}\text{I}$  se abren, y que el nivel de la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de los Estados Unidos de Norte América para la actividad en el aire de  $^{131}\text{I}$  en áreas restringidas ( $9 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/ml}$ ) se supera. Sin embargo, la actividad en el aire de  $^{131}\text{I}$  está por debajo del nivel de la Comisión Reguladora Nuclear para la actividad para áreas restringidas cuando cantidades de 100 mCi de  $^{131}\text{I}$  en forma de cápsula, o durante la manipulación del líquido  $^{131}\text{I}$  en el rango de 20 a 30 mCi. (Browning, Banerjee, & Reisinger, 1978)

En el año 2012 en el hospital Siriraj, Tailandia, se realizó un estudio del monitoreo del aire para controlar la ingesta de radioyodo ( $^{131}\text{I}$ ) contaminante inhalado por los trabajadores de medicina nuclear; mediante recolección de muestra utilizando filtros de celulosas impregnados y analizados, se demostró que la condición del lugar de trabajo es satisfactoria y el nivel de protección proporcionado al trabajador es suficiente para minimizar la dosis equivalente comprometida. El nivel de radioactividad de  $^{131}\text{I}$  en el aire debe mantenerse muy por debajo de los niveles permitidos. (Jiemwutthisak, Sritongkul, Chaudakshetrin, Kanchanaphiboon, & Tuntawiroon, 2012)

En el año 2017 en el Hospital Carlos Andrade Marín de la ciudad de Quito, Ecuador, se realizó un estudio con el objetivo de Elaborar filtros de carbón activado y evaluar su eficiencia en el monitoreo ambiental de  $^{131}\text{I}$  en el área de medicina nuclear, llegando a las siguientes conclusiones: Los filtros de Carbón activado son capaces de adsorber y absorber  $^{131}\text{I}$ , se determinó que la zona donde hay mayor concentración de material radiactivo en ese hospital es la sala de fraccionamiento, estando sin embargo dos órdenes de magnitud menor al límite permitido por el organismo internacional de energía atómica (OIEA) adicionalmente se encontraron también valores de tecnecio 99 ( $^{99}\text{Tc}$ ) presentes

en el ambiente por lo cual se recomienda ampliar el trabajo realizado para determinar si existe algún peligro debido a la presencia de este radionucleido, Las condiciones de trabajo son satisfactorias para minimizar la dosis equivalente comprometida de radiación recibida por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE). (Cadena Nogales, 2017)

En el año 2017 en un laboratorio de un instituto de medicina nuclear de la India se llevó a cabo un estudio de la identificación y medición de contaminantes radionucleidos emisores de rayos gamma en el aire dentro del laboratorio caliente del Instituto de Medicina Nuclear. La recolección de partículas de aire se realizó por succión de aire interior a través de papel de filtro usando un muestreador de aire Staplex. Las radiactividades de  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{131}\text{I}$  y  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  capturadas por el papel de filtro se evaluaron mediante espectrometría de rayos gamma. Las actividades observadas de radionucleidos naturales en muestras de aire variaron de 0.59 a 295 mBq / m<sup>3</sup> con un promedio de  $143 \pm 0.003$  mBq / m<sup>3</sup> para  $^{212}\text{Pb}$ ; 13.55 a 1911 mBq / m<sup>3</sup> con un promedio de  $402 \pm 0.007$  mBq / m<sup>3</sup> para  $^{214}\text{Pb}$ ; 0,69 mBq / m<sup>3</sup> a 571 mBq / m<sup>3</sup> con un promedio de  $57,33 \pm 0,009$  mBq / m<sup>3</sup> para  $^{228}\text{Ac}$ ; 7.85 a 2192 mBq / m<sup>3</sup> con un promedio de  $543 \pm 0.014$  mBq / m<sup>3</sup> para  $^{214}\text{Bi}$  y de 9.89 mBq / m<sup>3</sup> a 256 mBq / m<sup>3</sup> con un promedio de  $92.9 \pm 0.052$  mBq / m<sup>3</sup> para  $^{40}\text{K}$ . Las actividades de los radionucleidos artificiales en el filtro de aire variaron de 0.19 a 60.67 mBq / m<sup>3</sup> con un promedio de  $6.4 \pm 0.0$  mBq / m<sup>3</sup> para  $^{131}\text{I}$ ; 0.25 a 40.27 mBq / m<sup>3</sup> con un promedio de  $4.17 \pm 0.0$  mBq / m<sup>3</sup> para  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . La actividad de  $^{131}\text{I}$  se compara con los valores reportados de otros países del mundo. Esto demostró que la condición del lugar de trabajo es satisfactoria y que el nivel de protección proporcionado al trabajador es suficiente. (Ferdous, Sharmin, Begum, & Begum, 2017)

En el año 2017 la Organización internacional para la estandarización ISO realizó una publicación (ISO 16639:2017) sobre la vigilancia de las concentraciones de sustancias radiactivas en el aire en el lugar de trabajo de instalaciones nucleares con el objetivo de evaluar y mitigar los riesgos de inhalación para los trabajadores en las instalaciones donde estos puedan llegar al aire, este documento cubre el muestreo de aire objetivos del programa, diseño de programas de muestreo y monitoreo para cumplir con los objetivos del programa, métodos para muestreo y monitoreo de aire en el lugar de trabajo, y garantía de calidad para garantizar el rendimiento del sistema hacia la protección de los trabajadores contra exposiciones innecesarias por inhalación. En conjunto, estas actividades constituyen el programa de muestreo o vigilancia. (Surveillance of the activity

concentrations of airborne radioactive substances in the workplace of nuclear facilities (ISO 16639), 2017)

En el año 2019 el laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) de la UNAN Managua, realizó un protocolo con el objetivo de medir la posible contaminación de aire que pueden incorporar los trabajadores ocupacionalmente expuestos en las salas de medicina nuclear. En este documento se muestra el diseño metodológico que se debe de seguir para medir la posible contaminación de aire que pueden incorporar los trabajadores ocupacionalmente expuestos, causada por  $^{131}\text{I}$  en las salas de medicina nuclear, en este se detalla el procedimiento para llevar a cabo el muestreo, están estructurados de manera estándar y general, de tal modo que sean reproducibles y confiables. Todo esto organizado en tablas, donde el personal que realizara la muestra podrá tomar nota de todos los datos que sean necesarios para realizar la medición. (Herrera V., Mayorga M., Gutiérrez K., 2019)

En Argentina se realizó un proyecto sobre revisión de la protección radiológica en medicina nuclear y análisis de nuevas técnicas médicas, donde se presentan evaluaciones realizadas a partir de la dosimetría de área, dosimetría individual para la irradiación externa (dosímetros de cuerpo y anillo), concentración de  $^{131}\text{I}$  en aire y actividad en superficie, efectuadas en la instalación durante las prácticas. Respecto a mediciones realizadas durante el procedimiento de fraccionamiento, preparación y administración de diferentes actividades de  $^{131}\text{I}$  se llegó a las siguientes observaciones: no existe un protocolo de práctica, por lo tanto, los procedimientos de fraccionamiento, preparación y administración son muy dependientes de la decisión individual del operador. Este hecho queda de manifiesto en la gran dispersión de valores en las mediciones efectuadas y de la dosis recibida por el operador. Para el mejoramiento del control de la protección radiológica en los servicios de medicina nuclear se propone la revisión de los procedimientos de las inspecciones sobre la base de las actuales recomendaciones internacionales (IAEA-TECDOC 1113, septiembre de 1999) y la implementación de auditorías técnicas periódicas que permitan analizar en detalle la protección radiológica del trabajador. (Di Trano , y otros)

### **III. Planteamiento del problema**

Hoy en día el desarrollo e implementación de un plan de protección radiológica que incluya el uso de técnicas de monitoreo ambiental en los centros de medicina nuclear del país es indispensable, ya que esto permitirá aumentar las capacidades para determinar y minimizar el riesgo asociado a incorporación de material radiactivo debido a las diferentes fuentes abiertas que se utilizan ya sea para diagnóstico médico o tratamiento.

En Nicaragua actualmente, el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) solamente ofrece el servicio de dosimetría interna para la evaluación de captación de  $^{131}\text{I}$  en la tiroides del personal ocupacionalmente expuesto de los centros de medicina nuclear, siendo esta técnica no suficiente para evaluar las condiciones de trabajo a las que está expuesto los diferentes trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE's) en materia de contaminación ambiental, ya sea por exposición accidental o existente.

Debido a la importancia y necesidad de aumentar las capacidades de monitoreo de las radiaciones ionizantes en el país es que el LAF-RAM a través del Laboratorio de Control de calidad y Monitoreo (LCM) impulsan el desarrollo de un nuevo servicio que permitirá evaluar posibles concentraciones de  $^{131}\text{I}$  en aire utilizando filtros de carbón activado en los centros de medicina nuclear.



#### **IV. Justificación**

El presente proyecto dará lugar a sentar las bases para el desarrollo de un servicio de vigilancia ambiental que permitirá aumentar las capacidades en materia de protección radiológica para el monitoreo ambiental (aire), ya que sería el primer método a nivel nacional que permitirá evaluar los niveles de contaminación en aire en los diferentes servicios de medicina nuclear en el país.

Logrando así verificar que los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE's) no se encuentran expuestos a concentraciones en aire que excedan los límites de <sup>131</sup>I establecidos por las autoridades nacionales e internacionales, y además permitiría contrastar los valores de concentración derivada en aire con los resultados proporcionados de dosis efectiva comprometida por el Laboratorio de Dosimetría Interna (LDI) del LAF-RAM.

## V. Objetivos

### *Objetivo General*

- Elaborar procedimientos específicos para el muestreo de aire en áreas posiblemente contaminadas por  $^{131}\text{I}$  en el servicio de Medicina Nuclear del Centro Nacional de Radioterapia, Nora Astorga.

### *Objetivos específicos*

- Efectuar la calibración del sistema de detección CAPTUS 3000 del Laboratorio de Dosimetría Interna (LDI) para la geometría de los filtros de carbón activados utilizados para recolección de muestras.
- Evaluar la posible contaminación en aire por  $^{131}\text{I}$  que pueden inhalar los trabajadores ocupacionalmente expuestos en las áreas de medicina nuclear verificando que se encuentren bajo el límite recomendado por la OIEA 416,67 Bq/m<sup>3</sup>.
- Determinar las zonas de mayor concentración de  $^{131}\text{I}$  del servicio de medicina nuclear.
- Elaborar un instructivo técnico para el monitoreo de concentración derivada en aire en servicios de medicina nuclear.

## **VI. Hipótesis**

El nivel de concentración derivada en aire de  $^{131}\text{I}$  encontrada en el Servicio de Medicina Nuclear del Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga” en condiciones normales no superarán los límites establecidos por las normativas internacionales.

## **VII. Marco Referencial**

### **1. Medicina Nuclear**

La Medicina nuclear es una especialidad médica que utiliza elementos radiactivos, en forma de fuentes no encapsuladas, con fines diagnósticos, terapéuticos y de investigación. (Brosed Serreta & Puchal Añé, Fundamentos de física Médica, 2014, pág. 25). La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) expresa que la medicina nuclear consiste en la administración de radiofármacos al paciente para realizar mediciones fisiológicas, obtener imágenes de órganos, glándulas y sistemas, o para llevar a cabo ciertos tratamientos. Debido a que los procesos de eliminación de radiofármacos son relativamente lentos, se deben emplear isótopos en los que la actividad decaiga rápidamente, es decir de corto período de semidesintegración. Las ventajas de emplear esta técnica consisten en que se puede estudiar el comportamiento fisiológico en forma simple, no invasiva, y con bajo riesgo para el paciente. (Autoridad regulatoria Nuclear , 2000, págs. 137-138)

Por la utilización de fuentes radiactivas no encapsuladas, tanto en pacientes como en muestras de sangre u orina, se pueden producir contaminación en las superficies de trabajo y en todos los materiales con los que entre en contacto generándose residuos, que posteriormente se tienen que evacuar por lo que la Protección radiológica tendremos que considerarla en pacientes, personal expuesto y público en general.

En un Servicio de Medicina Nuclear las áreas se distribuyen como se detalla a continuación (Brosed Serreta, Ferrer García, & Paredes garcía, Fundamentos de Física Médica, 2016):

- Recepción, almacenamiento, manipulación y administración del material radiactivo.
- Atención a los pacientes (consultas, pruebas diagnósticas y tratamientos)
- Laboratorios para pruebas in vitro.
- Gestión de residuos radiactivos.
- Otras actividades: administrativas, almacenes no radiactivos, etc.

#### **1.1.Descripción y clasificación de las salas de medicina nuclear**

En una unidad de Medicina nuclear se pueden distinguir cuatro áreas funcionales bien diferenciadas: una primera, en la que se gestionan los radiofármacos (recepción,

preparación, residuos, etc.), la segunda, donde se utilizan los radiofármacos (exploración, determinación de laboratorio o tratamiento), la tercera, donde se elaboran los datos obtenidos en el área anterior y la cuarta que engloba la parte administrativa y de atención al usuario (paciente) además de los elementos comunes a los servicios médicos convencionales. A continuación, se define las áreas funcionales más importantes dentro de una sala de medicina nuclear:

### 1.1.1. Unidad de Radiofarmacia

La obtención de los radiofármacos puede hacerse actualmente de dos maneras. Una, que puede decirse que es la forma tradicional, consiste en obtener los radiofármacos en una unidad de radiofarmacia de la propia instalación. En este caso y dado que los radionucleidos han de ser de corto período de semidesintegración, se ha de disponer de un suministro externo tanto de generadores de  $^{99m}\text{Tc}$  como de otros radionucleidos más específicos ( $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{131}\text{I}$ , etc.)

Dentro de esta unidad también se puede encontrar:

**Cámara Caliente:** Dependencia en la que se almacenan y preparan los radiofármacos. Éstos se manipulan detrás de blindajes de plomo (*Ilustración 1*) para evitar al máximo la irradiación del operador.



*Ilustración 1: Cámara Caliente del servicio de medicina nuclear del CNR. A: Castillos de plomo. B: Activímetro. Fuente: Propia*

**Sala de marcaje celular:** Las condiciones de esterilidad ambiental impuestas por la manipulación de células que se reinyectarán, exige trabajar con cámaras de flujo laminar que garanticen la ausencia de elementos patógenos.

**Residuos:** Los residuos radiactivos sólidos se deben almacenar durante un cierto tiempo antes de su retirada o eliminación como residuo biológico o convencional. Para su recogida se emplean contenedores blindados especiales.

### 1.1.2. Salas de exploraciones y tratamientos

Las exploraciones diagnósticas que se llevan a cabo en la unidad de Medicina nuclear del CNR es a través de la obtención de imágenes para observar la distribución del radiofármaco según lo que el médico nuclear trate de averiguar para un diagnóstico certero.

En el servicio de medicina nuclear también se cuenta con salas específicas para:

**Administración de dosis:** Sala, normalmente colindante con la cámara caliente, en la que se administran los radiofármacos a los pacientes en la mayoría de exploraciones.

**Salas de exploraciones:** Dependencias en las que están instaladas las gamma cámaras u otros detectores como pueden ser los tomógrafos PET. El Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga” (CNR) cuenta con una Gamma Cámara, Nucline SPIRIT a como muestra la *Ilustración 2*.



*Ilustración 2:* Equipo de Gamma cámara, Nucline SPIRIT, del servicio de medicina nuclear del CNR. (A): Carro para colimadores. (B): Cabezal detector. Fuente: Propia.

**Habitaciones “plomadas” para tratamientos:** Habitaciones en las que los pacientes sometidos a tratamiento metabólico son internados durante uno o varios días para su control clínico y por motivos de protección radiológica.

### **1.1.3. Elaboración de datos y confección de informes**

Los estudios adquiridos mediante los equipos de imagen, así como las determinaciones de laboratorio, requieren de un procesado para la obtención de un diagnóstico.

Así, las gamma cámaras llevan asociadas estaciones de trabajo con programas específicos para Medicina nuclear que permiten tanto visualizar las imágenes según distintos formatos y tablas de color como realizar tratamientos numéricos complejos como es la reconstrucción tomográfica.

Estas estaciones de trabajo generan imágenes finales que son impresas en placa radiográfica o en papel para formar parte del informe médico.

En las determinaciones de laboratorio, se acostumbra a disponer de ordenadores personales conectados a los detectores de muestras que realizan los cálculos basándose en los recuentos obtenidos de los contadores.

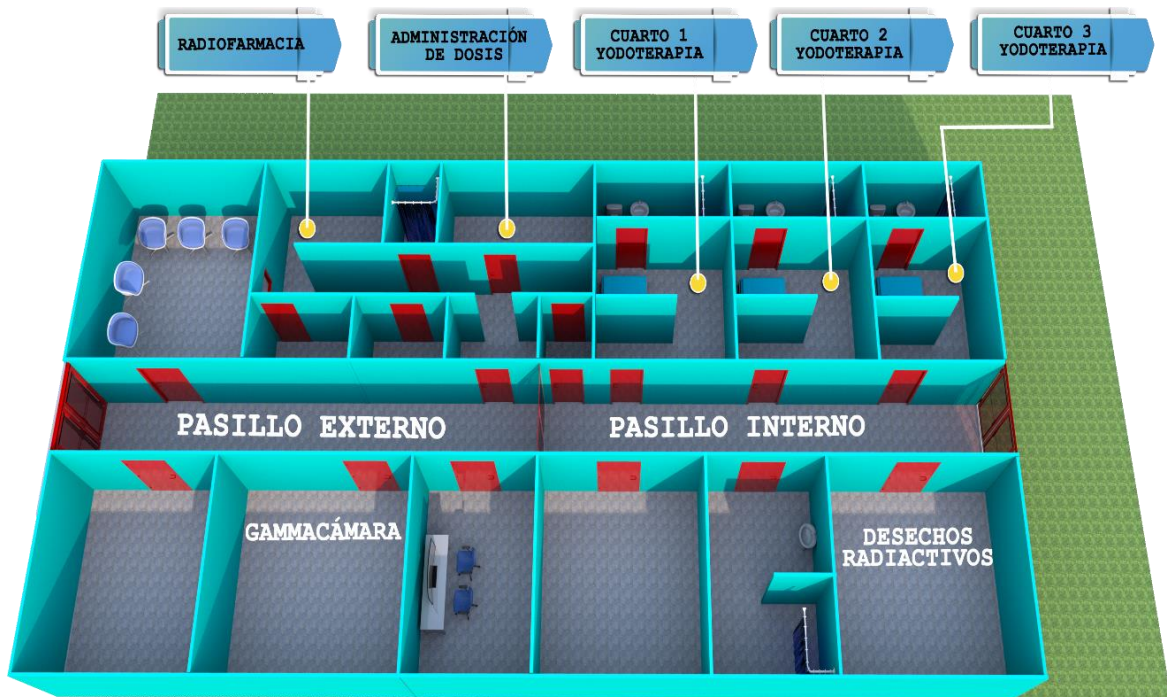
### **1.1.4. Área de gestión y atención al paciente**

Además de las salas de exploraciones, en toda unidad de Medicina nuclear existen dependencias donde se realizan las funciones de recepción de pacientes, salas de espera para pacientes en general y para pacientes ingresados y Archivos.

### **1.1.5. Servicios generales**

Engloba todos aquellos aspectos no relacionados directamente con la obtención de un diagnóstico pero que resultan imprescindibles para el funcionamiento de una unidad. Cabe destacar un aspecto de gran importancia en una unidad de Medicina nuclear como es la gestión de los residuos radiactivos (sólidos y líquidos) y biológicos. (Brosed Serreta & Puchal Añé, Fundamentos de física Médica, 2014, págs. 49-60)

En la siguiente Ilustración se puede observar como esta distribuido el servicio de medicina nuclear del CNR:



*Ilustración 3: Distribución de espacios en la sala de Medicina Nuclear del Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga”. Fuente: Propia.*

## 1.2. Clasificación de las áreas

La clasificación previa de las distintas zonas y su asignación a una categoría de riesgo radiológico se hace teniendo en cuenta las fuentes radiactivas que se van a utilizar (Brosed Serreta, Ferrer García, & Paredes garcía, Fundamentos de Física Médica, 2016, pág. 146).

(Organismo Internacional de Energía Atómica, 1997) define como zona controlada y zona supervisada:

**1.2.1. Zona Controlada:** Se define como zona controlada toda zona en la que se prescriban o pudieran prescribirse medidas protectoras o disposiciones de seguridad específicas para:

- Controlar las exposiciones normales o impedir la dispersión de la contaminación en condiciones normales de trabajo.
- Prevenir las exposiciones potenciales o limitar su magnitud.

**1.2.2. Zonas supervisadas:** Se define como zona supervisada toda zona que no haya sido ya definida como zona controlada, pero en la que sea preciso mantener bajo examen las condiciones de exposición ocupacional, aunque

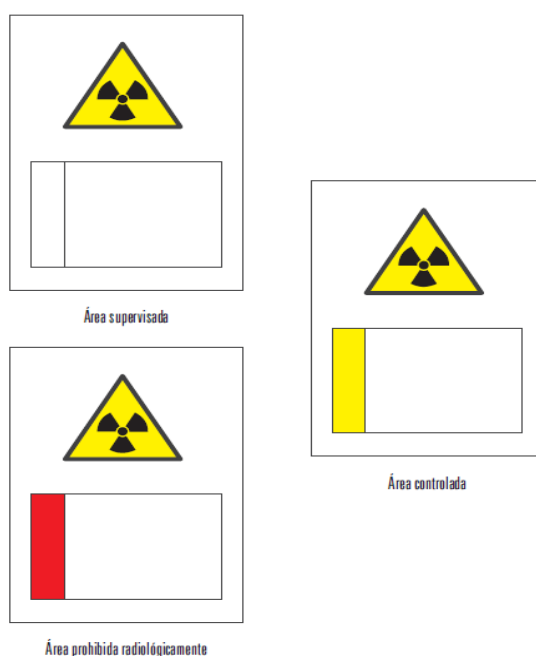


normalmente no sean necesarias medidas de protección ni disposiciones de seguridad específicas.

### 1.3. Señalización de las Áreas supervisadas y controladas

La Autoridad regulatoria Nuclear expresa que para identificar los riesgos se emplean tres señales básicas con el símbolo internacional de radiación y una etiqueta rectangular que posee una banda lateral a la izquierda, que puede ser blanca, amarilla o roja, a como se puede observar en la *Ilustración 4*.

La banda blanca indica que la zona de trabajo se define como área supervisada; la banda amarilla indica que se trata de un área controlada; la banda roja expresa prohibición de acceso a personas ajenas al personal del área controlada. (Autoridad regulatoria Nuclear , 2000, págs. 78-79)



*Ilustración 4:* Símbolos indicadores de áreas de trabajo. (Autoridad regulatoria Nuclear , 2000, pág. 79)

### 1.4. Radionucleidos más utilizados en medicina nuclear

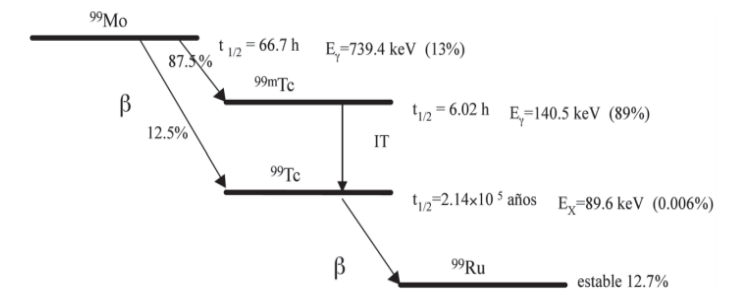
Los radionucleidos más utilizados en medicina nuclear son el  $^{99m}\text{Tc}$  para estudios diagnóstico y el  $^{131}\text{I}$  este último se utiliza tanto para fines diagnóstico como para terapéuticos.

#### 1.4.1. Tecnecio-99 metaestable ( $^{99m}\text{Tc}$ )

Solanes S. (2016) menciona que el radioisótopo de tecnecio que más se utiliza en Medicina Nuclear es el  $^{99m}\text{Tc}$  debido a que tiene un periodo de vida media de 6 horas y

no es necesario administrar grandes cantidades de fármaco a los pacientes; es capaz de emitir una radiación gamma monocromática, con una energía de 140 keV (*Ilustración 5*).

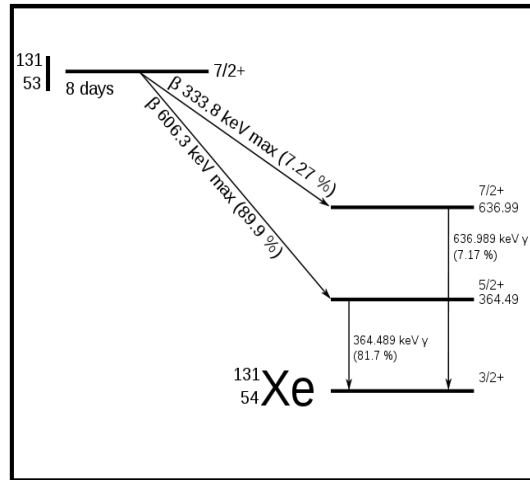
Se obtiene de un generador de  $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$  consta de una columna de vidrio o plástico llena de un material (resinas de intercambio iónico, alúmina u óxido de circonio) en el que se encuentra adsorbido el molibdeno. En el proceso de separación, denominado elución, se hace pasar una solución salina fisiológica a través de la columna que libera el  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , en forma de pertechnetato sódico, recogiéndolo en el vial de elución. Una vez hecha la elución, la actividad de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  va aumentando hasta transcurridas 23 horas, pasado este tiempo se llega a un equilibrio en el que la actividad va decayendo al mismo ritmo que la del  $^{99}\text{Mo}$ . (Brosed Serreta & Puchal Añé, Fundamentos de física Médica, 2014, pág. 41)



*Ilustración 5: Decaimiento radiactivo del  $^{99}\text{Mo}$  y  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . (Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México, 2010)*

#### 1.4.2. Yodo-131 ( $^{131}\text{I}$ )

Un tipo de exposición que es frecuente es la debida al  $^{131}\text{I}$ , un isótopo radiactivo de corta duración (período de semidesintegración de 8 días) que se desintegra con emisión de partículas beta (energía promedio para la emisión principal 0,19 MeV) y radiación gamma (emisión principal 0,36 MeV) (*Ilustración 6*). El yodo es absorbido rápidamente por la circulación después de su inhalación o ingestión, se concentra en la tiroides y se excreta predominantemente por la orina. Así, después de una incorporación, el  $^{131}\text{I}$  puede ser detectado directamente midiendo la actividad en el tiroides, o indirectamente a través de las muestras de orina.



*Ilustración 6: Desintegración del  $^{131}\text{I}$  (Kays666)*

### **Información biocinética del $^{131}\text{I}$**

Todas las formas comunes del yodo son fácilmente absorbidas por el cuerpo. Para la inhalación del yodo en forma de partículas, se supone una absorción pulmonar de tipo F o rápida, mientras que el vapor de yodo elemental se asigna al tipo SR-1 (soluble o reactivo), con absorción de tipo F.

## **2. Carbón Activado**

### **2.1. Filtros de carbón activado.**

El carbón activado es un material de carbón que se prepara en la industria para que tenga una elevada superficie interna y así poder adsorber (retener sobre su superficie) y absorber una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución. Se trata de un material poroso que se obtiene por carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos y turbas, con el fin de obtener un alto grado de porosidad y una importante superficie intraparticular. La elevada superficie específica facilita la adsorción física de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquidos. La actividad del carbón activado en los procesos de adsorción y absorción viene dada fundamentalmente, por la naturaleza de la materia prima y el proceso de activación utilizado en la producción del mismo. (Sevilla, 2010)



*Ilustración 7: Filtro de carbón activado fuente: propia*

## **2.2. Adsorción y absorción del yodo radiactivo.**

Los principales estudios sobre el uso de filtros de carbón activado (*Ilustración 7*) con aplicaciones para materiales radiactivos se da en procesos de descontaminación de ambientes con presencia de  $^{131}\text{I}$ ; donde mediante la impregnación de sustancias químicas se busca mejorar su capacidad de retención; es importante considerar que gracias al proceso de impregnación que sufre el carbón activado con sustancias químicas sumado a la gran porosidad que posee su estructura; el carbón activado es capaz de absorber y adsorber no solo para eliminar elementos radiactivos del ambiente si no también puede ser utilizado para cuantificarlos al retenerlos en su interior y posteriormente ser analizados utilizando espectrometría gamma. (Cadena Nogales, 2017)

## **3. Monitoreo**

El término de monitoreo es la acción y efecto de monitorear, en general consiste en la observación del curso de uno o más parámetros para detectar eventuales anomalías (Pérez Porto & Gardey, 2013). En protección radiológica el monitoreo tiene como objetivo garantizar que la exposición a la que están sujetos los trabajadores sea la menor razonablemente posible y que los límites de dosis no sean superados.

### **3.1. Monitoreo de personal y de área**

El monitoreo de los trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes es la herramienta fundamental que contribuye a alcanzar los objetivos de la protección radiológica ocupacional, esto es, asegurar que en condiciones normales de trabajo no se superen los límites de dosis y reducir las exposiciones al nivel más bajo que razonablemente pueda alcanzarse. Para posibilitar el efectivo control de los riesgos radiológicos debidos a la

irradiación externa o a la incorporación de material radiactivo, se definen las denominadas áreas controlada y supervisada.

Los métodos de monitoreo ocupacional pueden entonces agruparse en dos categorías, los aplicados en los ambientes de trabajo y aquellos utilizados directamente sobre el individuo. En relación a los primeros se pueden citar el monitoreo de los campos de radiación ambiental; el monitoreo de la contaminación del aire; y la medición de la contaminación de las superficies. Respecto a los segundos se pueden citar los dispositivos para la dosimetría individual de la radiación externa (dosímetros); el monitoreo de la contaminación interna mediante contador de cuerpo entero o de la actividad parcial en algún o algunos órganos; el monitoreo de la contaminación interna por técnicas de radio-bioanálisis; y la medición de la contaminación de la piel y ropa. (Autoridad regulatoria Nuclear , 2000, pág. 77)

**Monitoreo personal:** El personal debe contar con dosimetría personal, mediante dosímetros (film, TLD) de cuerpo entero y de extremidades en los casos que corresponda. El personal involucrado rutinariamente en el tratamiento de pacientes con yodo 131 debería ser incluido en un programa de monitoreo de la contaminación interna a través de mediciones de captación tiroidea con frecuencia apropiada.

**Monitoreo de área:** Los dos tipos básicos de monitoreo de área son: el monitoreo de la radiación externa que consiste en la medición de los niveles de tasa de dosis equivalente ambiental en diversos puntos significativos de la instalación y el monitoreo de la contaminación que consiste principalmente en la determinación de la presencia o no de material radiactivo depositado en superficies. En algunas circunstancias se deberá llevar a cabo también un monitoreo de la contaminación en aire por la presencia de gases o aerosoles radiactivos.

La contaminación puede ser:

1. Del aire cuando es causada por la liberación de gases o aerosoles radiactivos. La contaminación del aire en un servicio de medicina nuclear puede deberse a los radionucleidos empleados en estudios de ventilación pulmonar (tecnecio 99m, xenón 133) o bien a técnicas donde se utilicen yodo 131 o yodo 125.

2. Superficial cuando afecta el exterior de una persona (ropas, piel), equipo o material. La contaminación superficial puede a su vez ser removible cuando puede transferirse a otras superficies o fija cuando no se hace posible la remoción.

### **3.2. Monitoreo Ambiental**

El monitoreo ambiental consiste en la observación del medio ambiente para recoger información relacionada con la contaminación. Por lo general se establecen estaciones fijas que registran a diario los niveles de agentes extraños en la atmósfera, y unidades móviles que se encargan de tareas tales como la vigilancia y la inspección de diversas zonas. (Pérez Porto & Gardey, 2013)

El monitoreo ambiental de las áreas de trabajo permite controlar la dosis recibida por un trabajador, en base a las características de las sustancias radiactivas presentes, la naturaleza de los campos de radiación, la geometría y duración de la exposición, etc. Para ello, los procedimientos de medición a realizar son: Monitoreo de los campos de radiación ambiental, Monitoreo de la contaminación del aire y Medición de la contaminación de las superficies. (Autoridad regulatoria Nuclear , 2000, pág. 80)

#### **3.2.1. Contaminación del aire**

La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) menciona que para que las técnicas de muestreo y medición relativas al monitoreo del aire resulten efectivas y eficientes, se debe prestar atención a las características de los contaminantes y establecer procedimientos adecuados para que la concentración de actividad del aire muestreado sea representativa de la del aire inhalado por los trabajadores.

Para determinar la contaminación radiactiva del aire se utilizan dispositivos que toman muestras o que fuerzan la convección de un volumen conocido de aire a través de un filtro que, dependiendo de su eficiencia, retiene cierta parte del material radiactivo.

La relación de la actividad medida (teniendo en cuenta la eficiencia del filtro y eventuales decaimientos) con el volumen de aire filtrado permite determinar la contaminación radiactiva del aire, la que debe compararse con el DAC (Concentración derivada en aire).

## **4. Dosimetría Interna**

El consejo de seguridad nuclear “CSN” (2013) expresa que la Protección Radiológica tiene como fin proteger la salud de las personas de los efectos perniciosos de las radiaciones ionizantes, así como preservar el medioambiente.

La dosimetría interna tiene como objetivo la estimación de la dosis efectiva resultante de la incorporación al organismo de sustancias radiactiva. En este caso, los datos experimentales primarios son siempre medidas de actividad retenida/excretada por el organismo de la persona contaminada, estas medidas experimentales no permiten determinar de forma directa la dosis interna, sino que es necesario disponer de información adicional sobre:

- Las circunstancias de la incorporación (momento en que ésta se produce, radionucleido, forma química del contaminante, y el tamaño de partícula en el caso de inhalación de aerosoles radiactivos).
- Comportamiento biocinético del radionucleido incorporado, para poder determinar la incorporación a partir de las medidas experimentales.

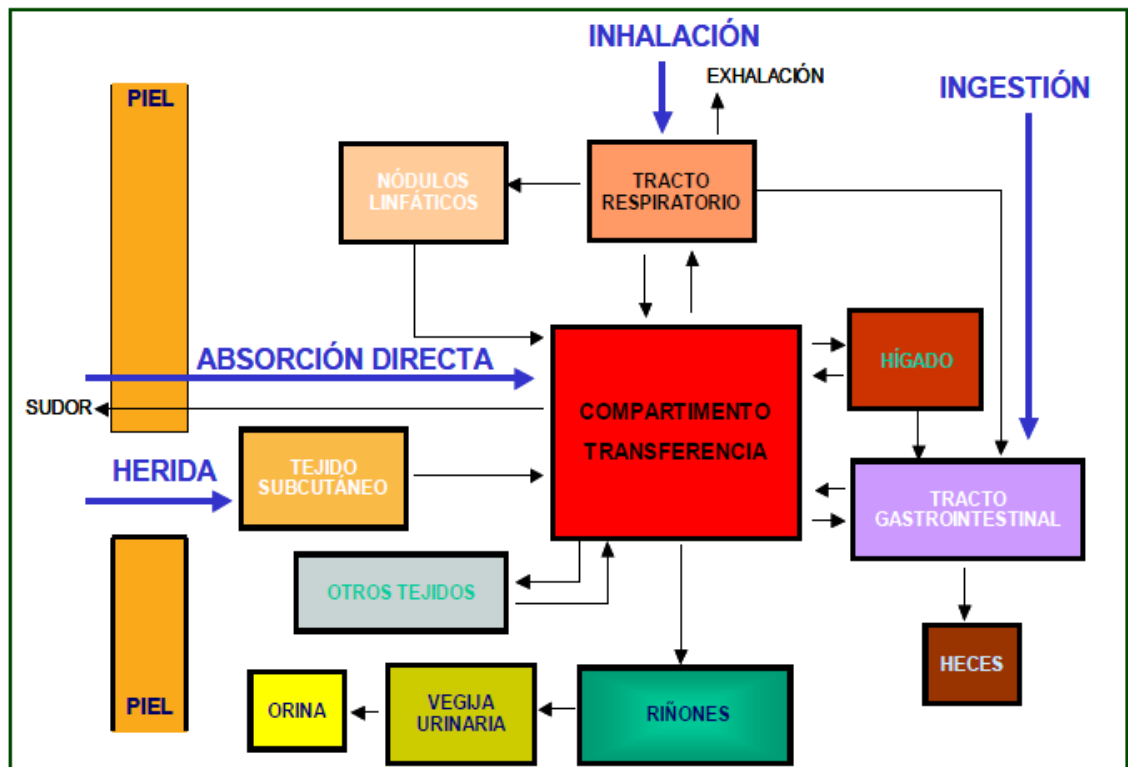
#### **4.1. Incorporación de los radionucleidos al organismo**

Las principales vías de entrada o incorporación son la inhalación de partículas radiactivas en suspensión, o de aerosoles radiactivos, y la ingestión de sustancias contaminadas, alimentos, agua, por ejemplo. También hay que considerar la posibilidad de incorporación por heridas o por absorción a través de la piel normal. A la incorporación y depósito del material radiactivo en alguna de las vías de entrada siguen procesos de absorción de éste hacia los líquidos extracelulares, sangre y linfa, considerados en los modelos dosimétricos como compartimentos de transferencia, en atención a que desde ellos se transfiere el contaminante a los diferentes órganos o tejidos. Esta transferencia se realiza con unas características complejas que dependen de la vía de incorporación y de las características del agente contaminante, en particular del radionucleido involucrado. La ***Ilustración 8*** presenta un diagrama explicativo, algo simplificado, de las vías o rutas de incorporación, transferencia, retención y excreción. (Consejo de seguridad nuclear, 2013)

***La ARN (2000) expresa que las vías de entrada para la incorporación de los radionucleidos son:***

- ***Inhalación:*** El material radiactivo incorporado por inhalación se deposita, inicialmente, en los distintos tramos del tracto respiratorio, donde se depura por transferencia a la sangre y hacia los ganglios linfáticos y también, por pasaje al tracto gastrointestinal.

- Ingestión: Parte del material radiactivo incorporado por ingestión se transfiere hacia los líquidos extracelulares, particularmente, a nivel del intestino delgado. El resto es excretado por heces.
- Incorporación por la piel: La piel es, en general, una buena barrera para la incorporación de material radiactivo. Sin embargo, deja de serlo cuando ha sufrido una lesión (herida o quemadura).



*Ilustración 8: Vías de incorporación, transferencia y excreción de la contaminación interna (Consejo de seguridad nuclear, 2013)*

#### 4.2. Modelos biocinéticos

Se denominan *modelos biocinéticos* los que se usan para describir el movimiento de los radionucleidos una vez incorporados al organismo. Los modelos dependen del modo de entrada (inhalación, ingestión y otros), de la forma química y física del contaminante y del tamaño de las partículas en el caso de inhalación. (Consejo de seguridad nuclear, 2013)

En la exposición ocupacional, la principal vía de incorporación es la inhalación, aunque una fracción de cualquier material depositado en el sistema respiratorio se transferirá a la garganta y será ingerido, dando oportunidad a que se produzca su absorción en el tracto gastrointestinal. Para los trabajadores ocupacionalmente expuestos, la Comisión



Internacional de Protección Radiológica (CIPR) ha desarrollado un juego de modelos que representan el comportamiento de los radionucleidos que se han incorporado al organismo por inhalación o ingestión. Estos modelos pueden aplicarse para ejercer el control reglamentario del lugar de trabajo.

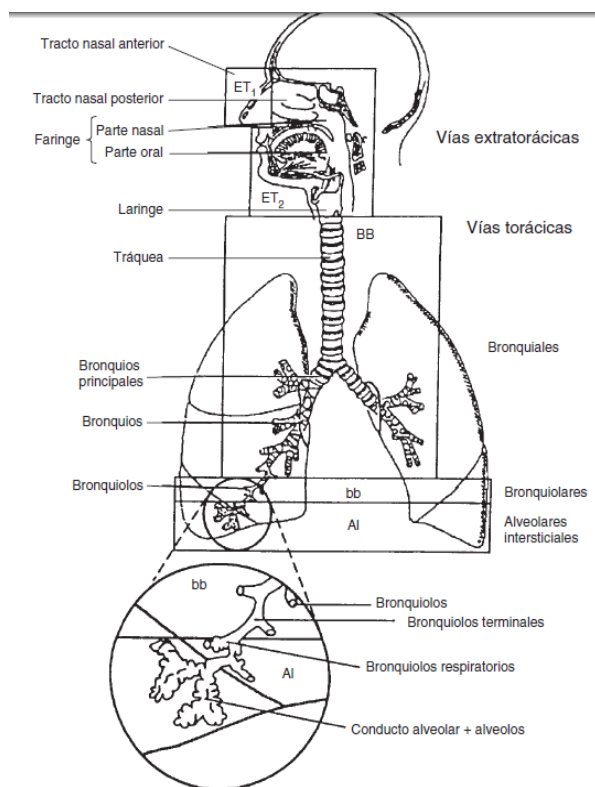
Estos modelos fueron diseñados fundamentalmente para calcular, de forma prospectiva, las posibles dosis por incorporación de radionucleidos y para establecer límites de incorporación. Los modelos biocinéticos elaborados por la CIPR se utilizan en situaciones normales, por ejemplo, para evaluar las dosis a partir de las mediciones realizadas dentro de los programas rutinarios de vigilancia radiológica. (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004, pág. 34)

#### **4.2.1. Modelo Biocinético para la inhalación**

OIEA (2004) menciona que en el caso de los radionucleidos inhalados por los trabajadores en forma de partículas, se supone que la entrada y el depósito regional en el tracto respiratorio están regidos sólo por la distribución del tamaño de las partículas de los aerosoles. La situación es diferente en relación con los gases y vapores, para los que el depósito en las vías respiratorias es específico del material. Casi todas las moléculas de gas inhaladas contactan con superficies en las vías respiratorias, pero generalmente retornan al aire a menos que se disuelvan o reaccionen con la mucosa superficial. La fracción de un gas inhalado o del vapor que se deposite en cada región dependerá entonces de su solubilidad y de su reactividad.

Por otro lado, el CSN (2013) expresa que este modelo descrito por ICRP66 describe matemáticamente el proceso de depósito de las partículas inhaladas en cada una de las regiones, la transferencia del material depositado mediante procesos de disolución y absorción en sangre, el transporte de partículas y finalmente proporciona la posibilidad de calcular la dosis en cada una de las regiones del Sistema Respiratorio. Se encuentra dividido en 5 regiones anatómicas (*Ilustración 9*):

- Nasal anterior
- Bronquios Principales
- Bronquios
- Bronquiolos
- Alveolos



*Ilustración 9: Modelo biocinético para la Inhalación (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004, pág. 38)*

### 4.3. Contaminación interna

Según el CSN (2013) la incorporación de un radionucleido en el organismo humano, sea cual sea la vía de incorporación, se denomina **contaminación interna**. La determinación de una contaminación interna y por consiguiente la dosis de radiación recibida por el organismo como resultado de una incorporación va a depender de un número de factores que debemos conocer:

- Características de los radionucleidos: Naturaleza de la radiación emitida en la desintegración, Período radiactivo de semidesintegración, Periodo biológico y periodo efectivo.
- Características del compuesto contaminante:
  - *La forma física y química del material inhalado*: Retención pulmonar y por consiguiente la dosis, el depósito en otros órganos y la dosis correspondiente y por último la Excreción (orina y heces).

Los compuestos se clasifican en tres grupos según los procesos de disolución y absorción de los mismos. Los grupos “por defecto” son:

TIPO F (Fast): Radionucleidos de velocidad de absorción rápida. El 100% es absorbido en sangre en 10 minutos.

TIPO M (Moderate): Radionucleidos de velocidad de absorción moderada. El 10% es absorbido en sangre en 10 minutos y el 90% en 140 días.

TIPO S (Slow): Radionucleidos de velocidad de absorción lenta. El 0,1% es absorbido en sangre en 10 minutos y el 99,9% en 7000 días.

- *Tamaño aerodinámico de las partículas contaminantes:* En los casos de incorporación por inhalación, debe tenerse en cuenta este parámetro porque en función del tamaño de las partículas contaminantes, estas se depositarán en diferentes partes del aparato respiratorio y por consiguiente variará la posible eliminación mecánica debida a la exhalación o deglución a través del sistema digestivo.

- Características del receptor (edad, sexo, peso, defectos anatómicos, etc.)

#### 4.3.1. Magnitudes en dosimetría interna

El consejo de seguridad nuclear (2013) menciona que:

-*Dosis equivalente comprometida en órganos y tejidos*  $H_T(\tau)$  recibida al cabo de un tiempo, se define como la integral respecto del tiempo de la tasa de dosis equivalente en un tejido u órgano T que recibiría un individuo

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H_T(t) dt \quad \text{ecuación 1}$$

Donde

- $H_T$  = Tasa de Dosis equivalente en el órgano o tejido T
- $\tau$  = período sobre el que se realiza la integración

-*Dosis Efectiva Comprometida* se define como la suma de las dosis equivalentes comprometidas en un tejido multiplicadas cada una de ellas por el factor de ponderación tisular correspondiente

$$E(\tau) = \sum_T W_T H_T(\tau) \quad \text{ecuación 2}$$

Donde

- $W_T$  = Factor de ponderación de los tejidos
- $(\tau)$  = 50 años y en niños 70 años

#### 4.4. Límites de aplicación en dosimetría interna

##### 4.4.1. Límite de incorporación anual (ALI)

Se denomina ALI a la actividad de un radionucleido que, incorporada anualmente, implica una dosis efectiva integrada en 50 años igual al límite anual propuesto para la dosis efectiva, esto es 20 mSv.

El ALI para cada radionucleido puede ser obtenido dividiendo el límite anual de dosis efectiva (0,02 Sv) por el coeficiente de dosis  $e(50)$  correspondiente a las características de la incorporación. (Consejo de seguridad nuclear, 2013)

$$ALI = \frac{0,02}{e(50)} Bq \quad \text{ecuación 3}$$

Donde

- $e(50)(Sv \cdot Bq^{-1})$ : Coeficiente de dosis definido para cada radionucleido.

Para el  $^{131}I$  el límite de incorporación anual sustituyendo en la ecuación 3 el coeficiente de dosis correspondiente (*Tabla #11. Anexo 4*), se obtiene:

$$ALI = \frac{0,02 Sv}{2 \times 10^{-8} Sv/Bq}$$

$$ALI = 1 \times 10^6 Bq$$

##### 4.4.2. Concentración derivada en aire (DAC)

La OIEA (2004) expresa que la concentración derivada en aire (por sus siglas en ingles DAC) es el límite derivado de la concentración de la actividad en el aire de un radionucleido específico, calculado de tal forma que un trabajador típico que respire el aire con una contaminación constante en la DAC mientras realiza una actividad física ligera durante un año de trabajo, recibiría el límite anual de incorporación para el

radionucleido en cuestión. Calculada como el límite anual de la dosis efectiva dividida por el coeficiente de dosis,  $e(50)_{inh}$ , y el volumen del aire inhalado por el trabajador adulto de referencia en un año activo ( $2,4 \times 10^3 \text{ m}^3$ ). La unidad de la DAC es  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . El CSN (2013) afirma que el límite de concentración derivada en aire debe ser calculado como el valor de la concentración de actividad en aire ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) respirada por un individuo-tipo (tasa inhalación =  $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a lo largo de un año laboral (2000 h).

$$DAC \left( \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) = \frac{I_{inh}}{2000 (h) * 1,2 \left( \frac{\text{m}^3}{h} \right)} \quad \text{ecuación 4}$$

Por otro lado, la ISO 16639 (2017) expresa que el DAC se puede calcular dividiendo el ALI por el volumen de aire respirado por el hombre de referencia bajo trabajo de actividad ligera durante un año laboral (en  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). La ARN (2000) lo expresa numéricamente de la siguiente manera:

$$DAC = \frac{ALI}{2400} \left( \text{Bq}/\text{m}^3 \right) \quad \text{ecuación 5}$$

- $2\ 400 \text{ m}^3$  corresponde a la tasa de respiración de  $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  y un año de trabajo de  $2\ 000 \text{ h}$ .

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación 5 el límite de incorporación anual obtenido en la sección 4.4.1. el cálculo teórico de la concentración derivada en aire de  $^{131}\text{I}$  es la siguiente:

$$DAC = \frac{1 \times 10^6}{2400} \left( \text{Bq}/\text{m}^3 \right)$$

$$DAC = 416,67 \left( \text{Bq}/\text{m}^3 \right)$$

Este valor se puede comparar con el recomendado por la OIEA 2004 (*Tabla #12. Anexo 4*)

Para el cálculo experimental de concentración derivada en aire en las diferentes zonas del servicio de medicina nuclear del CNR, se utilizará la ecuación propuesta por (Jiemwutthisak, Sritongkul, Chaudakshetrin, Kanchanaphiboon, & Tuntawiroon, 2012)

$$DAC = \frac{cps \times e^{-\lambda t}}{E \times V} \left( Bq/m^3 \right) \quad \text{ecuación 6}$$

Donde

- **CPS** = Cuentas por segundos
- **E** = Eficiencia del detector
- **V** = Volumen de aire colectado
- $e^{-\lambda t}$  = Factor de decaimiento
- **t** = Intervalo de tiempo entre el tiempo de recolección y el tiempo de medición.

## 5. Vigilancia Radiológica

La vigilancia radiológica no mide directamente las dosis efectivas comprometidas individuales; se necesitan modelos biocinéticos para relacionar el nivel de actividad. Estas medidas pueden ser interferidas por otros radionucleidos presentes en el organismo; Se pueden utilizar muestreadores de aire estáticos o personales (PAS), para determinar la concentración de material radiactivo suspendido en el aire. (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004)

Si la experiencia ha demostrado que es poco probable que las dosis efectivas comprometidas por la incorporación anual de radionucleidos debido a la exposición ocupacional excedan de 1 mSv, entonces puede resultar innecesario el control individual, pero no así la vigilancia radiológica del lugar de trabajo. Ej.: Manipulación de grandes cantidades de radiofármacos, tales como  $^{131}\text{I}$  para terapia.

### 5.1. Vigilancia de la concentración en aire de sustancias radiactiva en el lugar de trabajo

La ISO 16639 (2017) menciona que el objetivo principal de la vigilancia de las concentraciones de actividad en el aire en el lugar de trabajo es evaluar y mitigar los riesgos de inhalación para los trabajadores en instalaciones donde estos pueden llegar al aire.

Las técnicas de muestreo de aire consisten en dos enfoques generales. El primer enfoque es el muestreo retrospectivo, en el que se toma una muestra de aire, el medio de recolección se retira y se lleva a un sistema detector de radiación y se analiza la sustancia radiactiva, y los resultados de concentración se ponen a disposición en un momento

posterior. En este contexto, las concentraciones de aire medidas se evalúan retrospectivamente. El segundo enfoque es un monitoreo continuo del aire en tiempo real para que los trabajadores puedan ser advertidos de una liberación significativa de la radioactividad en el aire puede haber ocurrido. Implementar un programa de muestreo de aire efectivo, es importante para lograr un equilibrio entre los dos enfoques generales.

La función del monitoreo continuo del aire es proporcionar una alerta al personal de física que las concentraciones en el aire han excedido un umbral tal que el nivel de protección planeado que brinda el equipo de protección personal (PPE) ha sido o podría ser excedido. El programa de muestreo debe interactuar con el personal que trabaja en otros elementos del programa de protección radiológica, como control de contaminación y dosimetría interna.

#### **5.1.1. Razones para realizar programas de vigilancia**

Las técnicas específicas utilizadas en un programa de muestreo o vigilancia se basan en los propósitos del muestreo. Incluso si las concentraciones en el aire son muy bajas, el muestreo puede realizarse de forma rutinaria debido a la posibilidad de altas exposiciones y dosis, en caso de que se produzcan liberaciones.

#### **5.2. Métodos directos e indirectos para la vigilancia radiológica**

La *medición directa* de fotones gamma o de rayos X (incluida la radiación de frenado o “bremsstrahlung”) emitidos por radionucleidos depositados internamente, con frecuencia se denomina medición de la actividad corporal, medición del cuerpo entero o recuento de la radiactividad corporal.

Los *métodos indirectos* consisten en mediciones de la actividad en muestras que pueden ser biológicas (por ejemplo, excretas) o físicas (por ejemplo, filtros de aire). Depende principalmente de la naturaleza de la radiación que se va a medir.

Las mediciones de muestras de aire pueden ser difíciles de interpretar, porque establecen la concentración de radionucleidos en el aire en la posición en que se encuentra el muestreador y no necesariamente en la zona de inhalación del trabajador al menos que sea un (PAS). Este método de control depende para su interpretación de los coeficientes de dosis y de las concentraciones derivadas en aire (DAC). La distribución del tamaño de las partículas suspendidas en el aire debería determinarse utilizando impactadores en cascada u otros métodos. En general, cuanta más información específica se posea sobre

el material y el lugar, mejor será la evaluación de las dosis. (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004)

### **5.2.1. Métodos indirectos**

La OIEA (2004) expresa que los métodos indirectos se basan en la determinación de la concentración de la actividad en materiales biológicos separados del cuerpo (orina, sangre, etc.) o en muestras físicas obtenidas en el entorno de trabajo, como muestras de aire o de contaminación de las superficies. Los métodos indirectos son apropiados para radionucleidos que no emiten una radiación penetrante.

#### **5.2.1.1. Muestras biológicas**

Las muestras biológicas para estimar incorporaciones de radionucleidos son: orina, heces, sangre, aliento, secreciones nasales y muestras de tejido; siendo las muestras de orina y de heces las empleadas con mayor frecuencia.

#### **5.2.1.2. Muestras físicas**

Constituidas por muestras de aire, frotis y raspado de superficies y otros materiales del entorno de trabajo que pueden ser utilizados para identificar la forma fisicoquímica de los contaminantes radiactivos.

Muestra de aire: Pueden obtenerse del entorno atmosférico por medio de muestreadores fijos, o de las zonas en las que respiran los trabajadores con muestreadores individuales de aire (PAS). Sin embargo, para otras fuentes tales como las partículas resuspendidas, las muestras pueden conducir a estimaciones erróneas de la actividad del material inhalado en un orden de magnitud o más, según las posiciones relativas de la fuente, del muestreador y del trabajador.

El muestreo se basa en la extracción del material radiactivo del aire a su paso por un medio de retención. Este medio será específico hasta cierto punto para el material que deberá ser recolectado. Por ejemplo, las partículas pueden ser retenidas en filtros de fibras, mientras que se emplean lechos de carbón activado para retener el gas radón y los vapores de yodo, y el agua tritiada puede recogerse en trampas de agua.

El análisis del tamaño de las partículas y la solubilidad de las muestras de material radiactivo aerotransportado pueden ayudar a elaborar modelos biocinéticos para la



evaluación de las dosis. La comparación directa de las muestras de aire con valores de concentraciones derivadas en aire puede ser utilizada como base para valorar las condiciones del lugar de trabajo y estimar las dosis.

### **5.3. Detección de radiación**

Los equipos que realizan evaluaciones radiométricas se pueden dividir en tres tipos: para medir partículas alfa, para partículas beta y para las emisiones de fotones.

#### Alfa:

- El recuento más simple de la actividad alfa total puede realizarse mediante un detector ZnS o con un contador proporcional de flujo de gas (no pueden identificar y cuantificar radionucleidos individuales en una mezcla).
- Métodos de espectroscopia alfa mediante el uso de detectores semiconductores o cámaras de ionización con rejilla (necesitan tiempos de recuento prolongados para obtener la sensibilidad adecuada).
- Detección de trazas de partículas alfa (requieren un mes o más para realizar un análisis completo)

#### Beta:

- Recuento por centelleo líquido.
- Contadores Geiger–Müller de flujo gaseoso o detectores proporcionales (emisores beta de altas energías depositadas en planchetas o filtros).

#### Emisiones de fotones:

- Detectores de centelleo por NaI (Tl) o con semiconductores como el Ge de alta pureza.
- Fluorimetría de la radiación ultravioleta.
- Análisis de trazas de productos de fisión, Activación neutrónica y la espectrometría de masas con plasma acoplado por medios inductivos (ICP/MS).

## **6. Monitoreo de la concentración derivada en aire (DAC)**

El monitoreo en aire puede proporcionar una alerta temprana a los trabajadores con respecto a las concentraciones elevadas de radiactividad. Este monitoreo en tiempo real

puede ser un método efectivo para reducir o eliminar las exposiciones al aire, sustancia radiactiva o gas.

### **6.1. Términos básicos para el monitoreo del <sup>131</sup>I**

#### ***Sustancia radiactiva en el aire***

Sustancia radiactiva dispersa en el aire en forma de polvos, humos, partículas, nieblas, vapores o gases.

#### ***Área de contaminación del aire***

Área accesible para individuos donde las concentraciones de actividad medidas de un radioactivo en el aire, la sustancia excede o es probable que exceda los criterios nacionales aplicables.

#### ***Muestra de aire***

Dispositivo diseñado para pasar un volumen conocido de aire que contiene una sustancia radiactiva a través de un filtro u otros medios y, por lo tanto, atrapar la sustancia radiactiva en el aire en los medios de muestreo.

#### ***Incorporación***

Actividad de un radionucleido introducido en el cuerpo en un período de tiempo determinado o como resultado de un evento determinado.

#### ***Muestreo***

Recolección de una sustancia radiactiva en medios como filtros, absorbedores o adsorbentes que se analiza para contenido radiactivo después de la recolección.

#### ***Vigilancia***

Monitoreo y muestreo de aire, y la evaluación de la medición de concentración de actividad.

### **6.2. Frecuencia del muestreo**

La frecuencia de la recolección de muestras debe basarse en las tasas de ocupación, niveles de peligro, propósitos de muestreo (por ejemplo, protección del trabajador y/o verificación de la contención) y requisitos para niveles mínimos de detección. A menudo,

el monitoreo se lleva a cabo en áreas ocupadas rutinariamente donde los trabajadores puedan estar expuestos a una concentración de actividad superior a 1-DAC durante una semana laboral de 40 horas o 5-DAC en una jornada laboral de 8 horas (ambos típicamente llamados 40 DAC-h). El enfoque y la frecuencia de muestreo seleccionados deben diseñarse para asegurar que se cumplan los límites de detección, en relación con los objetivos de protección radiológica.

Al seleccionar ubicaciones para el muestreo en el lugar de trabajo y el equipo de monitoreo, se debe considerar la ubicación de los puntos de liberación y trabajadores, el propósito de la muestra (es decir, estimar la ingesta de trabajadores, advertencia de altas concentraciones, prueba de fugas, o definición de áreas de contaminación del aire), y los patrones de flujo de aire que afectan la dispersión temporal y espacial de la sustancia radiactiva en el aire en el lugar de trabajo después de la liberación. (Surveillance of the activity concentrations of airborne radioactive substances in the workplace of nuclear facilities (ISO 16639), 2017)

La autoridad reguladora recomienda que el muestreo se realice de forma semestral o al menos una vez al año debido a la toxicidad de los radionucleidos utilizados en instalaciones nucleares y a la carga de trabajo del centro para garantizar la seguridad radiológica del personal ocupacionalmente expuesto.

### **6.3. Tipos de estudio del flujo del aire**

La ISO 16639 (2017) expresa que los tipos de estudios del flujo del aire se dividen en dos tipos:

#### **6.3.1. Cualitativo**

Los *estudios cualitativos* del flujo de aire se basan en la observación visual de un marcador liberado de una posible liberación. Ubicaciones en el área de trabajo para observar patrones generales de flujo de aire. Como guía general, se deben realizar *pruebas cualitativas* para el trabajo, espacios que tienen una probabilidad razonable de que una ingesta supere el 2% del ALI en un año o en el aire los patrones de flujo son simples y bien entendidos.

### **6.3.2. Cuantitativo**

Los *estudios cuantitativos* de flujo de aire proporcionan mediciones reales de concentraciones de partículas de aerosol liberadas o trazadoras de gas en un lugar de trabajo. Las *pruebas cuantitativas* deben realizarse en espacios de trabajo donde existe una probabilidad razonable de que una ingesta supere el 2% del ALI en una semana.

## **7. Ubicación de los muestreadores para la colocación de áreas de contaminación del aire**

La incorporación por inhalación de partículas radiactivas puede ser estimada indirectamente a través de la concentración de radionucleidos en el aire a través de 3 tipos de muestreadores de aire: Muestreadores estáticos (SAS) "static air samplers", Muestreadores portátiles, Muestreadores personales (PAS) "personal air samplers".

Según la ISO 16639 (2017) el muestreo con el propósito de publicar áreas de contaminación del aire requiere que las muestras estén en un área tal que midan de manera confiable las concentraciones de actividad representativas del lugar de trabajo independientemente de la ubicación de lanzamiento. *En áreas de trabajo con un único punto de liberación*, colocar la muestra inmediatamente viento abajo del punto de liberación proporciona la mejor indicación de las concentraciones que requieren radiológica clasificación del área. La colocación en una ventilación de escape también es apropiada si los efectos de dilución aún permitirían detección de una liberación. Tal determinación se puede hacer con métodos cuantitativos de análisis flujo de aire y dispersión de partículas de gas / aerosol en el área.

Para un *área con muchos puntos de liberación posibles*, hay varias alternativas posibles. Primero, los muestreadores pueden colocarse a favor del viento de cada punto de liberación. En segundo lugar, se puede colocar una muestra en cada ventilación de escape de la habitación cuando una evaluación cuantitativa muestra que la dinámica de dispersión entre el muestreador y los respiraderos de escape aún permite la detección sensible de la liberación.

### **7.1. Ubicación de muestreadores portátiles**

Los muestreadores portátiles se usan generalmente en instalaciones donde la ubicación de sustancias radiactivas en el aire cambia debido a prácticas rutinarias o especiales (por

ejemplo, mantenimiento), que a menudo crean aire real o probable zonas de contaminación. Debido a que estos muestreadores se pueden mover fácilmente, deben ubicarse lo más cerca posible tan práctico para la zona de respiración del trabajador. El conocimiento del flujo de aire en el área de trabajo es útil en determinar dónde ubicar muestreadores portátiles.

## **7.2. Recolección de muestras**

Las técnicas adecuadas para recolectar muestras son necesarias para garantizar resultados precisos y significativos. Las características físicas y químicas de la sustancia radiactiva en el aire determinar el método de recolección de muestras, y la forma de la sustancia radiactiva en el aire pueden ser categorizadas como partículas de aerosol, vapor o gas. Los métodos y estrategias de muestreo son determinados en función del propósito de la medición.

### **7.2.1. Muestreo de aerosol**

El muestreo de partículas de aerosol generalmente se realiza dibujando un aerosol a través de un filtro con las partículas recogiendo en el filtro. Las partículas recogidas se analizan luego utilizando técnicas de conteo nuclear.

La muestra debe ser representativa con respecto al aire y las partículas de aerosol de interés. La sedimentación de partículas de aerosol entre el volumen de interés y la muestra debe tomarse en cuenta. La selección del tipo de filtro debe considerar lo siguiente:

- Eficiencia de recogida en el filtro;
- Entierro de partículas y sus efectos sobre la eficiencia del conteo y la resolución espectral;
- Caída de presión a través del filtro.

Se usa un tubo de transporte de muestra (un tubo para transportar el aire muestreado desde una ubicación a cierta distancia del medio de recolección) está permitido donde esté justificado. El uso de una boquilla de muestreo puede disminuir la penetración debido a la deposición de partículas en el tubo, donde la penetración es el porcentaje de partículas que llegan a los medios de recolección al número total de partículas que ingresan al tubo de muestreo. El diseño del tubo de muestreo debe maximizar la penetración. La penetración debe superar el 50% para partículas polidispersas con un diámetro

aerodinámico de la mediana de la actividad (DAMA) de 5  $\mu\text{m}$  y una geometría desviación estándar de aproximadamente 2,5.

### **7.2.2. Muestreo de gas**

El muestreo de gases radiactivos se puede realizar utilizando técnicas activas o pasivas. Muestra activa la recolección implica la extracción de aire a través de un medio a través de un recipiente de muestra de gas adecuado que puede estar equipado con un detector de radiación. El muestreo pasivo se basa en la difusión browniana del gas a los sitios de recolección. Después del muestreo, los medios de recolección se pueden analizar directamente para determinar la cantidad del gas radiactivo recogido, o el gas puede ser desadsorbido (es decir, por calentamiento) y recogido para su análisis. Se requieren correcciones a la concentración medida para eficiencias de recolección inferiores al 95%.

El carbón activado a menudo se usa para tomar muestras de gases radiactivos y tiene una recolección relativamente alta eficiencia para yodo, vapores orgánicos y halógenos. La eficiencia de recolección del carbón depende en tiempo de contacto, temperatura, humedad, tamaño de partícula de carbón, concentraciones de gas, densidad de empaque y la edad del carbón. El tamaño óptimo del carbón vegetal para el yodo varía de 0,6 mm a 1,7 mm (Malla 12 a malla 30) y se debe usar un tamaño en este rango. La zeolita de plata también se puede usar para tomar muestras yodo y tiene la ventaja de recoger yodo y excluir otros halógenos.

Algunos gases, el yodo en particular, también se acumula en las partículas de aerosol. El muestreo de la fracción de partículas puede requerir técnicas descritas sobre muestreo de partículas de aerosol. Muestras combinadas que recolectan la fracción de partículas en un filtro primero luego recolecta la fracción de gas usando, por ejemplo, carbón activado.

## **8. Espectrometría Gamma (EG)**

Una de las técnicas más fiables en la identificación y el análisis cuantitativo de muestras radiactivas es la espectrometría gamma, que consiste en la adquisición de la distribución energética de los fotones emitidos por un radioelemento. Para realizar el análisis del espectro energético de los fotones adquiridos de los diversos isótopos.

Para el análisis por espectrometría gamma, normalmente se utilizan dos tipos de detectores, los cuales serán especificados a continuación (Pérez Zeledón, 2016):

### **8.1. Detector de Centelleo**

Los detectores de centelleo por su mayor densidad, es más eficiente en detener la radiación que un gas. Por lo tanto, la eficiencia de un detector de centelleo es muy superior a la de uno de gas, especialmente para rayos gamma. En segundo lugar, el proceso de luminiscencia, o sea la absorción de radiación y la posterior emisión de luz, es muy rápido, disminuyendo el tiempo muerto.

El material que produce el destello se llama cristal de centelleo. Se selecciona para que tenga una alta eficiencia en absorber radiación ionizante y emitir luz (luminiscencia). Debe ser transparente para poder transmitir la luz producida, y debe estar a oscuras para que la luz ambiental no le afecte.

### **8.2. Detector de Ioduro de Sodio**

La característica más notable reside en la alta eficiencia de centelleo. La respuesta a radiación gamma y beta es prácticamente lineal para un rango amplio de energías y se los emplea usualmente en espectrometría gamma. Se pueden construir en diversos tamaños, por lo general en forma cilíndrica.

Sus desventajas son: la fragilidad (son fácilmente deteriorables por efectos mecánicos o térmicos), altamente higroscópicos (se opacan al hidratarse, deben encapsularse de manera estanca) y el tiempo de decaimiento del impulso luminoso resulta alto frente a tasas elevadas de contaje.

### **8.3. Factor de Calibración**

(Pérez Zeledón R., 2019) La determinación cuantitativa de los radioelementos presentes en las muestras requiere el conocimiento de la eficiencia ( $\epsilon$ ) del sistema muestra - detector, que permitirá establecer la relación entre la tasa de recuento del detector y la tasa de emisión de la muestra recolectada.

La eficiencia de nuestro sistema de detección dependerá de diversos factores propios de las condiciones de laboratorio en las que se realicen las mediciones de actividad depositada en los filtros. Tales como la geometría de la muestra, la composición y geometría del EG.

El factor encontrado estará derivado de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\text{cuentas}}{A}$$

*ecuación 7*

Donde A es la actividad en Bq, del filtro utilizado para calibración.

#### **8.4. Análisis Espectral**

En el análisis espectral a lo que se toma mayor importancia es a la identificación de los picos encontrados en el espectro y el número de cuentas que conforman a ese pico (el área del pico).

En espectrometría muchas veces se pueden observar muchos picos, y en caso que al momento de realizar el análisis el interés sea en un radionucleido en específico se utilizan buscadores automáticos del software utilizados, sin embargo, cuando no es de interés un radionucleido en específico si no varios, se realiza un análisis “manual” seteando ciertos valores de ventana para los diferentes picos.

Cuando se quiere ver la cantidad de cuentas de los picos encontrados el método más sencillo para realizarlo es la suma de todas las cuentas encontradas para la energía del elemento que se analizará. Se debe de tener presente para definir las cuentas que corresponden a eventos de ionización debido a fuentes el análisis del fondo natural y el fondo debido a picos de altas energías, para ser restado del espectro adquirido de la medición. (Pérez Zeledón, 2016)



## **VIII. Diseño Metodológico**

El modelo de estudio es perteneciente a la metodología cuantitativa por ser una investigación de diferentes variables, se posee un enfoque de particularidad y su orientación es hacia la verificación, el objetivo consiste en recopilar datos para la investigación que pueden medirse o cuantificarse mediante dimensiones, indicadores y escalas de medición, que permiten probar la hipótesis planteada, se pretende obtener resultados confiables.

### **Tipo de estudio**

El tipo de estudio es experimental ya que solo se observa y estudia el comportamiento del problema sin modificarlo como lo es la concentración en aire de  $^{131}\text{I}$  en las salas de medicina nuclear y es de corte transversal.

## Definición de las variables dependientes e independientes

Tabla #1. Definición de las variables

| Variables  | Sub variables   | Naturaleza de la variable | Indicador   |
|--|---|---------------------------|---|
| Monitoreo en aire                                  | Punto de medición   | Cualitativa               | Zona en la sala de medicina nuclear que se considera con mayor concentración de $^{131}\text{I}$  |
|  | Filtros de carbón activado  | -                         | Dispositivo elaborado de carbón activado para la absorción y adsorción del $^{131}\text{I}$   |
|  | Actividad   | Cuantitativa              | Número promedio de transiciones nucleares espontaneas de un estado de energía particular que ocurre en una cantidad de $^{131}\text{I}$ en un intervalo de tiempo |
|  | Tiempo  | Cuantitativa              | Tiempo en que se recolecta la muestra   |
| Concentración derivada en aire de $^{131}\text{I}$ | Radiactividad del $^{131}\text{I}$ absorbido por el filtro de carbón activado | Cuantitativa              | Actividad de $^{131}\text{I}$ dividida por el volumen total de la muestra y factor de eficiencia  |
| Factor de Calibración                              | Lectura del Activímetro   | Cuantitativa              | Actividad reportada por el Activímetro de medicina nuclear  |
|  | Eficiencia  | Cuantitativa              | Cuentas indicadas por el sistema lector del CAPTUS 3000   |

## Métodos e instrumentos de recopilación de datos

### a. Calibración del sistema de detección CAPTUS 3000 para la geometría de los filtros de carbón activado utilizados para recolección de muestras.

En la calibración del sistema de detección CAPTUS 3000 para la geometría de los filtros utilizados para la recolección de muestras, se seleccionó un filtro cilíndrico de carbón activado con una geometría de 2,26” x 1,05”, al cual se le denominó como fuente de referencia; este se impregnó (*Ilustración #17. Anexo 5*) con  $^{131}\text{I}$  a una actividad especificada en la *tabla #2*, el valor de la actividad fue obtenido por medio de un Activímetro ubicado en la cabina de flujo laminar del servicio de medicina nuclear. Posteriormente se esperó a que el material radiactivo se depositara de forma uniforme sobre el filtro, para verificar la geometría de impregnación como muestra la *Ilustración 10* en una Gamma Cámara.

**Tabla # 2.** *Valores iniciales del filtro de referencia*

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| <b>Fecha</b>                   | 2019/07/17 |
| <b>Actividad Inicial (mCi)</b> | 2,18       |



*Ilustración 10: Verificación de geometría de impregnación y espectro emitido por la fuente.*

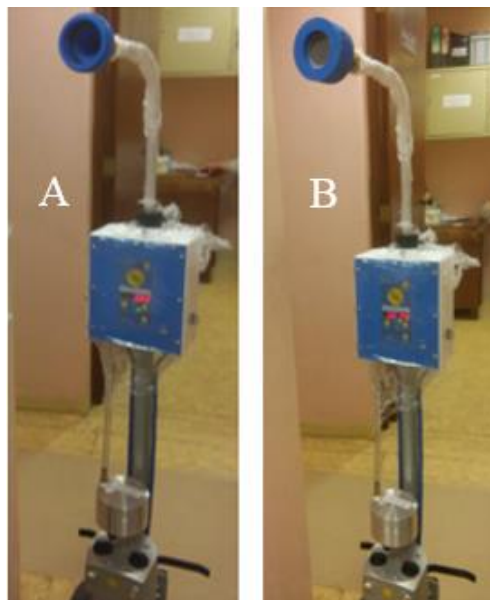
Después de verificar que la geometría de impregnación fuera la esperada, se procedió a establecer la geometría de medición (*ilustración 11*) a seguir para el análisis de los filtros recolectados en la evaluación de la DAC.



*Ilustración 11: Geometría de medición con una distancia fuente detector de 18 cm.*

**b. Monitoreo en aire para la evaluación de la DAC de  $^{131}\text{I}$  en medicina nuclear**

Para la recolección de muestras de aire, el LAF-RAM a través del Laboratorio de Control de calidad y Monitoreo (LCM) cuenta con un flujómetro (*Ilustración 12*) que permite regular la cantidad de flujo de aire que será aspirado para la recolección de las muestras; así mismo el LAF-RAM cuenta a través del Laboratorio de Dosimetría Interna (LDI), con un sistema de Yoduro de Sodio activado con talio[NaI(Tl)] para la cuantificación del material radiactivo recolectado durante el muestro.



*Ilustración 12: Flujo metro del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM); A: Sin Filtro, B: Con Filtro. Fuente: Propia*

## **b.1. Descripción General del Fluómetro**

- El muestreador de aire móvil de bajo volumen montado en carro modelo DF-14ME con medidor de flujo digital tiene un cuello de cisne de muestreo ajustable de aluminio.
- El cuello de cisne ajustable permite el muestreo en altura variando de 122 cm a 213 cm sobre el nivel del piso.
- El modelo DF-14ME contiene lo último en tecnología microprocesador electrónico, que proporciona mediciones de caudal corregidas, volumen total y un puerto de comunicaciones RS232.
- Tiene una gran pantalla LED brillante.
- El muestreador de aire DF-14ME incluye una bomba de vacío de paletas de carbono sin aceite con un flujo de aire constante regulador para uso donde es deseable un flujo de aire casi constante.
- El regulador mantiene una presión constante cae a través de un orificio en línea variando el flujo a través de una válvula de derivación hacia la bomba. Este sistema permite que la bomba funcione con una caída de carga mínima en todo momento, permitiendo que funcione más fría, por lo tanto, extendiendo su vida útil. La bomba sin aceite no requiere lubricación para mantener una eficiencia óptima durante su vida útil y está montada en un carro móvil con dos ruedas de goma para permitir la movilidad de transporte de la unidad. El rango de flujo de operación típico es de 0.5 a 4 CFM (14 a 115 LPM).

### ***b.1.1. Características estándar del equipo:***

- Pantalla LED brillante.
- Las totalizaciones de caudal y volumen visualizadas se corrigen a una configuración de fábrica Temperatura y presión de referencia (4 opciones disponibles)
- Las condiciones de referencia o flujo ambiental son seleccionables por el operador.
- Medidor de tiempo transcurrido.
- Exportación de datos RS232 en formato ASCII en cadena de texto delimitado por comas en varios operadores frecuencias de descarga seleccionables.

- Almacenamiento del tiempo y volumen transcurridos en caso de corte de energía.
- Detección de la condición de flujo cero después del retorno de energía para pausar el tiempo transcurrido hasta el regreso del flujo.
- Apagado automático en tiempo o volumen.

### **b.2. Monitoreo en medicina nuclear**

Para la evaluación de la concentración derivada en aire se definieron dos días para la recolección de muestras, delimitándose los puntos más “calientes” a partir de una reunión con la física médico encargada del servicio de medicina nuclear, siendo los siguientes:

#### ***Primer día:***

| <i>Punto de Medición</i>        | <i>Código</i> |
|---------------------------------|---------------|
| Radio Farmacia                  | RF            |
| Radio Farmacia Entrada          | RFE           |
| Administración de Radio Fármaco | AD            |
| Entrada del Pasillo Interno     | PIE Ent.      |
| Salida del Pasillo Interno      | PIE Sal       |
| Pasillo Externo                 | PE            |

*Segundo día:*

| <i>Punto de Medición</i>        | <i>Código</i> |
|---------------------------------|---------------|
| Radio Farmacia                  | RF            |
| Radio Farmacia Entrada          | RFE           |
| Administración de Radio Fármaco | AD            |
| Entrada del Pasillo Interno     | PIE Ent.      |
| Pasillo Externo                 | PE            |
| Cuarto 1                        | C1            |
| Cuarto 2                        | C2            |
| Cuarto 3                        | C3            |
| Desecho Radioactivos            | DR            |

Para la recolección de la muestra se utilizaron filtros de carbón activado impregnados con una sustancia química que mejora la capacidad de absorción y adsorción del carbón; estos filtros son insertados en el flujómetro (*ilustración 12*) que tiene la función de aspirar cierto volumen de aire durante un periodo de tiempo seleccionado; en este caso el tiempo por cada punto de muestreo fue de 15 min, período en el cual las partículas de  $^{131}\text{I}$  son captadas y retenidas por el filtro para su cuantificación. Cabe recalcar que por factor tiempo el primer día no se realizaron mediciones en todos los puntos previstos.

Una vez que se realizaron todas las mediciones se llevaron los filtros al Laboratorio de Dosimetría Interna del LAF-RAM para su lectura con el equipo de espectrometría gamma CAPTUS 3000.

### **b.3. Instrumento para la recolección de la muestra**

A continuación, se muestran las tablas para recolectar la información de los puntos que se monitorearon.

**Tabla #3. Recolección de la muestra**

| Área de muestreo: |                |                      | Altura de muestreo:       |                           |                            |
|-------------------|----------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Radionucleido     | Hora de inicio | Hora de Finalización | Flujo (m <sup>3</sup> /s) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Hora de medición actividad |
|                   |                |                      |                           |                           |                            |
|                   |                |                      |                           |                           |                            |

*Fuente:* (Herrera V., Mayorga M., Gutiérrez K., 2019)

**Tabla #4. Análisis para calibración de los filtros**

| Fechas de Medición | Días transcurridos | Actividad [mCi] | Actividad [Bq] | Cuentas Brutas | Cuentas Fondo | Cuentas netas | Factor de Calibración [cuentas/mCi] | Factor de Conversión [cuentas/Bq] |
|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                    |                    |                 |                |                |               |               |                                     |                                   |
|                    |                    |                 |                |                |               |               |                                     |                                   |

*Fuente:* Propia



## IX. Análisis y discusión de resultados

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos durante la calibración del sistema de detección y la recolección de muestras.

### a. Calibración del sistema de yoduro de Sodio [NaI(Tl)]

**Tabla #5. Cuentas obtenidas por el CAPTUS 3000 del filtro de referencia**

| No. de espectro  | 13/08/2019 | 16/08/2019 | 19/08/2019 | 22/08/2019 | 26/08/2019 | 29/08/2019 | 05/09/2019 | 19/09/2019 | 30/09/2019 | 03/10/2019 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>No. 1</b>     | 2935782    | 2470617    | 1765083    | 1393439    | 1061497    | 826612     | 461462     | 142586     | 54401      | 41522      |
| <b>No. 2</b>     | 2936995    | 2465821    | 1761332    | 1390252    | 1062568    | 824868     | 460462     | 142644     | 54072      | 41048      |
| <b>No. 3</b>     | 2937772    | 2464482    | 1765161    | 1396192    | 1062367    | 826326     | 460117     | 142762     | 53879      | 41770      |
| <b>No. 4</b>     | 2937149    | 2468565    | 1768106    | 1399537    | 1058399    | 824579     | 459644     | 142367     | 54061      | 41388      |
| <b>No. 5</b>     | 2932236    | 2467810    | 1766787    | 1400847    | 1060163    | 822887     | 458999     | 142977     | 54131      | 41161      |
| <b>No. 6</b>     | 2934511    | 2464448    | 1769295    | 1402439    | 1058786    | 823985     | 458514     | 143415     | 54407      | 41389      |
| <b>No. 7</b>     | 2938036    | 2465046    | 1767932    | 1401259    | 1057432    | 823783     | 459853     | 143117     | 53713      | 41239      |
| <b>No. 8</b>     | 2934711    | 2465245    | 1763278    | 1402927    | 1059461    | 823935     | 457897     | 142051     | 53866      | 41603      |
| <b>No. 9</b>     | 2933345    | 2463680    | 1765681    | 1402842    | 1058353    | 822941     | 456777     | 142219     | 53986      | 40960      |
| <b>No. 10</b>    | 2933906    | 2465334    | 1769884    | 1399934    | 1057808    | 825583     | 457855     | 142466     | 53940      | 41046      |
| <b>CPS Prom.</b> | 2935444    | 2466105    | 1766254    | 1398967    | 1059683    | 824550     | 459158     | 142660     | 54046      | 41313      |
| <b>Desv. EST</b> | 2001,0     | 2188,7     | 2686,0     | 4307,7     | 1882,7     | 1300,2     | 1416,0     | 419,6      | 223,7      | 267,2      |
| <b>CV(%)</b>     | 0.07       | 0.09       | 0.15       | 0.31       | 0.18       | 0.16       | 0.31       | 0.29       | 0.41       | 0.65       |

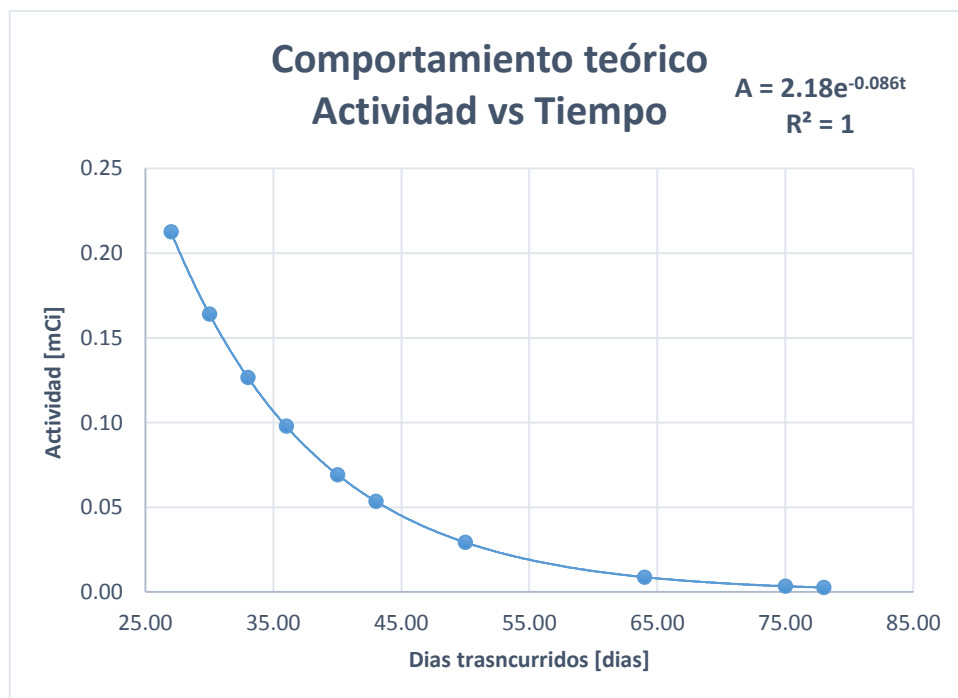
**Tabla #6. Evaluación del factor de eficiencia**

| Fechas de Medición | Dias transcurridos | Actividad [mCi] | Actividad [Bq] | CPS prom | CPS Fondo | CPS Neta | Factor de Eficiencia [CPS/mCi] | Factor de Conversión [CPS/Bq] |
|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|----------|-----------|----------|--------------------------------|-------------------------------|
| 13/08/2019         | 27.00              | 0.2126          | 7.87E+06       | 2935444  | 334       | 2935110  | 13806689.56                    | 0.373                         |
| 16/08/2019         | 30.00              | 0.1641          | 6.07E+06       | 2466105  | 354       | 2465751  | 15022386.85                    | 0.406                         |
| 19/08/2019         | 33.00              | 0.1267          | 4.69E+06       | 1766254  | 334       | 1765920  | 13934307.32                    | 0.377                         |
| 22/08/2019         | 36.00              | 0.0979          | 3.62E+06       | 1398967  | 339       | 1398628  | 14293584.90                    | 0.386                         |
| 26/08/2019         | 40.00              | 0.0693          | 2.56E+06       | 1059683  | 354       | 1059329  | 15283970.89                    | 0.413                         |
| 29/08/2019         | 43.00              | 0.0535          | 1.98E+06       | 824550   | 355       | 824195   | 15401383.12                    | 0.416                         |
| 05/09/2019         | 50.00              | 0.0293          | 1.08E+06       | 459158   | 340       | 458818   | 15676930.8                     | 0.424                         |
| 19/09/2019         | 64.00              | 0.0088          | 3.24E+05       | 142660   | 328       | 142332   | 16259453.74                    | 0.439                         |
| 30/09/2019         | 75.00              | 0.0034          | 1.25E+05       | 54046    | 364       | 53682    | 15830133.93                    | 0.428                         |
| 03/10/2019         | 78.00              | 0.0026          | 9.69E+04       | 41313    | 329       | 40984    | 15652865.99                    | 0.423                         |
| <b>CPS Prom.</b>   |                    |                 |                |          |           |          |                                | <b>0,409</b>                  |
| <b>Desv. EST</b>   |                    |                 |                |          |           |          |                                | <b>0,023</b>                  |
| <b>CV(%)</b>       |                    |                 |                |          |           |          |                                | <b>5,55</b>                   |

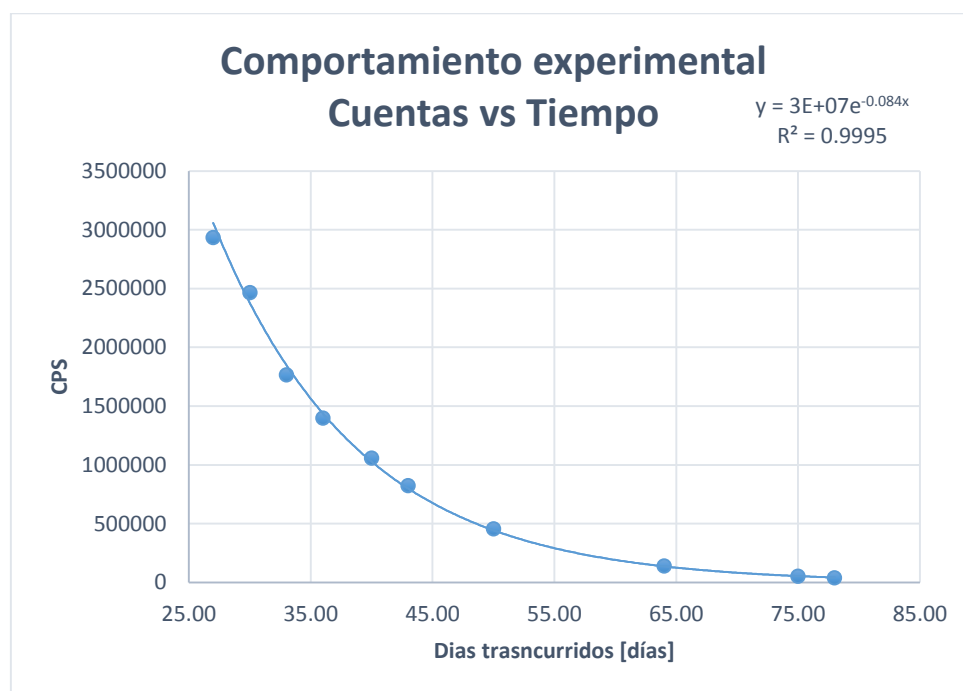
En la **Tabla #5** se muestran los resultados de las cuentas obtenidas por un periodo de 2 meses, comprendido desde el 13 de agosto del 2019 al 03 de octubre del 2019, durante el cual se recolectaron un total de 100 espectros gamma del filtro de referencia, con la finalidad de poder observar el comportamiento de decaimiento del  $^{131}\text{I}$  y así poder comparar gráficamente el decaimiento de las mediciones experimentales con el obtenido teóricamente. Los 100 espectros que se mencionan anteriormente se obtuvieron en 10 días diferentes de medición, observándose un coeficiente de variación máximo del 0.65 %, indicándonos esto que nuestro montaje es repetible y confiable. Cabe mencionar que se comenzaron a analizar los filtros aproximadamente un mes después de la impregnación, es decir, hasta que la actividad del filtro decayera a 0,21 mCi; debido a que el detector se saturaba, había una pérdida de información de casi el 60%.

A continuación, se muestran gráficas del comportamiento del decaimiento radiactivo, partiendo teóricamente de la actividad obtenida del Activímetro y las cuentas obtenidas experimentalmente; en función de los días transcurridos, donde se puede apreciar que las constantes de decaimiento tienen una diferencia del 2,32%.

**Gráfica #1.** Comportamiento teórico de la Actividad en función del tiempo.



**Gráfica #2.** Comportamiento experimental de las cuentas en función del tiempo.

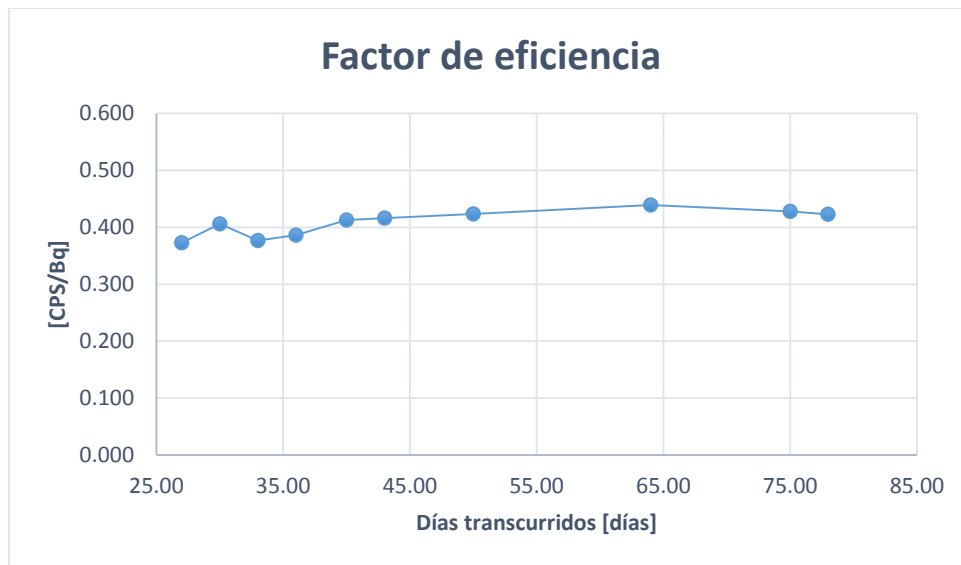


El valor de la actividad inicial (proporcionada por el servicio de medicina nuclear) del filtro se tomó en cuenta, para realizar correcciones por decaimiento radiactivo para cada momento de medición.

En la **Tabla #6** se puede observar que utilizando los valores de cuentas promedio de los días de recolección de la **tabla 5** y corrigiéndolos por decaimiento logramos obtener un factor de conversión de cuentas a actividad, para así poder determinar las cantidades de material radiactivo que se podrían impregnar en los filtros al momento de realizar el muestro en el servicio de medicina nuclear. Es de gran relevancia recalcar que el factor encontrado fue de 0,409 CPS/Bq, con un comportamiento constante ya que su coeficiente de variación en el transcurso de las mediciones fue de un 5,55 %.

El comportamiento descrito anteriormente se puede observar en la **gráfica #3** mostrado a continuación.

**Gráfica #3.** Comportamiento del factor de eficiencia en función del tiempo.



En las tablas que se muestran en las siguientes páginas, se podrán observar los datos obtenidos a partir del muestreo in situ del servicio de medicina nuclear en los puntos calientes establecidos.

**b. Evaluación de la DAC de <sup>131</sup>I en el servicio de medicina nuclear**

**Tabla #7. Datos para el cálculo de la concentración derivada en aire de <sup>131</sup>I correspondiente al primer día de monitoreo.**

|                               | <b>RF</b>           | <b>RFE</b>          | <b>AD</b>           | <b>PIE Ent.</b>     | <b>PIE Sal.</b>     | <b>PE</b>           |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                               | <b>Filtro No. 1</b> | <b>Filtro No. 2</b> | <b>Filtro No. 3</b> | <b>Filtro No. 4</b> | <b>Filtro No. 5</b> | <b>Filtro No. 6</b> |
|                               | 322                 | 348                 | 357                 | 377                 | 332                 | 315                 |
|                               | 327                 | 345                 | 350                 | 344                 | 323                 | 308                 |
|                               | 329                 | 339                 | 354                 | 350                 | 351                 | 321                 |
|                               | 308                 | 334                 | 315                 | 380                 | 310                 | 332                 |
|                               | 351                 | 348                 | 348                 | 336                 | 363                 | 325                 |
|                               | 322                 | 363                 | 356                 | 329                 | 334                 | 324                 |
| <b>Cuentas Promedio</b>       | <b>327</b>          | <b>346</b>          | <b>347</b>          | <b>353</b>          | <b>336</b>          | <b>321</b>          |
| <b>Fecha/Hora Reco.</b>       | 2019-11-04 14:23    | 2019-11-04 14:47    | 2019-11-04 15:00    | 2019-11-04 15:18    | 2019-11-04 15:34    | 2019-11-04 15:52    |
| <b>Fecha/Hora Med.</b>        | 2019-11-05 10:55    | 2019-11-05 11:25    | 2019-11-05 11:50    | 2019-11-05 12:30    | 2019-11-05 13:45    | 2019-11-05 14:05    |
| <b>t. transcurrido (h)</b>    | 20.53               | 20.63               | 20.83               | 21.20               | 22.18               | 22.22               |
| <b>Cuentas Corregidas</b>     | 351                 | 373                 | 374                 | 381                 | 363                 | 347                 |
| <b>Cuentas Netas</b>          | 6                   | 27                  | 28                  | 35                  | 18                  | 2                   |
| <b>Actividad Filtro [Bq]</b>  | 15.08               | 67.23               | 69.20               | 86.26               | 44.05               | 5.27                |
| <b>DAC (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>63.66</b>        | <b>283.75</b>       | <b>291.88</b>       | <b>363.32</b>       | <b>184.88</b>       | <b>22.13</b>        |

**Tabla # 8. Datos para el cálculo de la concentración derivada en aire de <sup>131</sup>I correspondiente al segundo día de monitoreo.**

| Cuarto 1                      | RF                  | AD                  | RFE                 | Cuarto 2            | Cuarto 3            | DR                  | PIE Ent.            | PE                  |                     |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Filtro No. 1                  | Filtro No. 2        | Filtro No. 3        | Filtro No. 4        | Filtro No. 5        | Filtro No. 6        | Filtro No. 7        | Filtro No. 8        | Filtro No. 9        |                     |
| 365                           | 349                 | 323                 | 337                 | 339                 | 339                 | 337                 | 344                 | 349                 |                     |
| 332                           | 343                 | 365                 | 361                 | 352                 | 335                 | 338                 | 333                 | 316                 |                     |
| 339                           | 345                 | 348                 | 348                 | 348                 | 344                 | 369                 | 348                 | 338                 |                     |
| 332                           | 328                 | 351                 | 352                 | 372                 | 354                 | 361                 | 350                 | 359                 |                     |
| 345                           | 351                 | 341                 | 333                 | 335                 | 342                 | 364                 | 317                 | 330                 |                     |
| 348                           | 368                 | 339                 | 330                 | 360                 | 364                 | 337                 | 326                 | 366                 |                     |
| <b>Cuentas Promedio</b>       | <b>344</b>          | <b>347</b>          | <b>345</b>          | <b>344</b>          | <b>351</b>          | <b>346</b>          | <b>351</b>          | <b>336</b>          | <b>343</b>          |
| <b>Fecha/Hora Reco.</b>       | 06/11/2019<br>08:59 | 06/11/2019<br>09:18 | 06/11/2019<br>09:38 | 06/11/2019<br>09:55 | 06/11/2019<br>10:13 | 06/11/2019<br>10:29 | 06/11/2019<br>10:47 | 06/11/2019<br>11:03 | 06/11/2019<br>11:19 |
| <b>Fecha/Hora Med.</b>        | 07/11/2019<br>09:30 | 07/11/2019<br>10:00 | 07/11/2019<br>10:30 | 07/11/2019<br>11:00 | 07/11/2019<br>11:35 | 07/11/2019<br>14:20 | 07/11/2019<br>15:09 | 07/11/2019<br>10:56 | 07/11/2019<br>11:00 |
| <b>t. transcurrido (h)</b>    | 24.52               | 24.70               | 24.87               | 25.08               | 25.37               | 27.85               | 28.37               | 23.88               | 23.68               |
| <b>Cuentas Corregidas</b>     | 375                 | 380                 | 377                 | 376                 | 384                 | 383                 | 389                 | 366                 | 373                 |
| <b>Cuentas Netas</b>          | 25                  | 30                  | 27                  | 26                  | 35                  | 33                  | 39                  | 17                  | 24                  |
| <b>Actividad Filtro [Bq]</b>  | 62.31               | 73.17               | 66.14               | 64.18               | 85.23               | 81.04               | 95.42               | 41.11               | 58.23               |
| <b>DAC (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>259.36</b>       | <b>304.35</b>       | <b>274.96</b>       | <b>266.60</b>       | <b>353.66</b>       | <b>333.28</b>       | <b>391.73</b>       | <b>171.51</b>       | <b>243.11</b>       |

Para los resultados de la DAC en la **Tabla #7 y #8** se tomaron en cuenta los siguientes datos:

|  |        |
|--|--------|
| <b>T 1/2: Tiempo Vida Media [h]</b>                        | 192,96 |
| <b><math>\lambda</math>: Constante de decaimiento[1/h]</b> | 0,004  |
| <b>E: Factor de Eficiencia [cuentas/Bq]</b>                | 0,409  |
| <b>V: Volumen Extraído [m<sup>3</sup>]</b>                 | 0,22   |

**Tabla #9. Coeficiente de variación de las cuentas correspondientes a la tabla #7**

|                  | <b>RF</b>           | <b>RFE</b>          | <b>AD</b>           | <b>PIE Ent.</b>     | <b>PIE Sal.</b>     | <b>PE</b>           |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                  | <b>Filtro No. 1</b> | <b>Filtro No. 2</b> | <b>Filtro No. 3</b> | <b>Filtro No. 4</b> | <b>Filtro No. 5</b> | <b>Filtro No. 6</b> |
| <b>CPS Prom.</b> | 327                 | 346                 | 347                 | 353                 | 336                 | 321                 |
| <b>Desv. EST</b> | 14.1                | 9.9                 | 15.9                | 21.3                | 19.1                | 8.4                 |
| <b>CV (%)</b>    | 4.3                 | 2.9                 | 4.6                 | 6.0                 | 5.7                 | 2.6                 |

**Tabla #10. Coeficiente de variación de las cuentas correspondientes a la tabla #8**

|                  | <b>Cuarto 1</b>     | <b>RF</b>           | <b>AD</b>           | <b>RFE</b>          | <b>Cuarto 2</b>     | <b>Cuarto 3</b>     | <b>DR</b>           | <b>PIE Ent.</b>     | <b>PE</b>           |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                  | <b>Filtro No. 1</b> | <b>Filtro No. 2</b> | <b>Filtro No. 3</b> | <b>Filtro No. 4</b> | <b>Filtro No. 5</b> | <b>Filtro No. 6</b> | <b>Filtro No. 7</b> | <b>Filtro No. 8</b> | <b>Filtro No. 9</b> |
| <b>CPS Prom.</b> | 344                 | 347                 | 345                 | 344                 | 351                 | 346                 | 351                 | 336                 | 343                 |
| <b>Desv. EST</b> | 12.4                | 13.0                | 14.0                | 12.1                | 13.7                | 10.7                | 15.2                | 13.2                | 18.7                |
| <b>CV (%)</b>    | 3.6                 | 3.7                 | 4.1                 | 3.5                 | 3.9                 | 3.1                 | 4.3                 | 3.9                 | 5.4                 |

En las tablas anteriores se muestran las cuentas de cada filtro utilizado para los diferentes días de muestreo y el promedio de esta; el tiempo transcurrido para el cual se tomó en cuenta la fecha/hora de recolección de la muestra y lectura de los filtros. Las cuentas netas

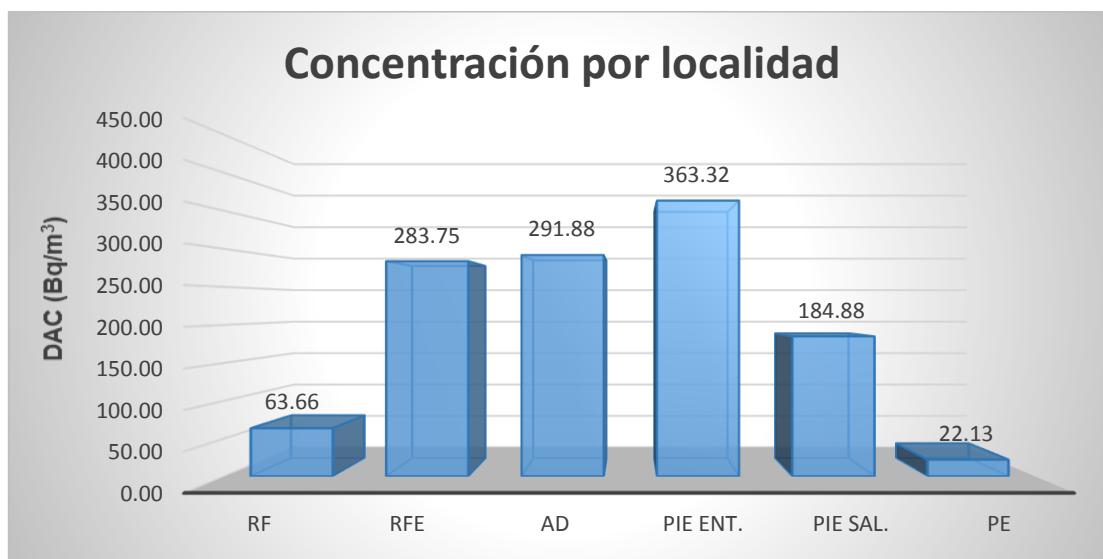


corresponden a la diferencia de las cuentas corregidas y el promedio de las cuentas de fondo el cual equivale a 345 CPS para el primer día de monitoreo y 350 CPS para el segundo día de monitoreo; estas cuentas corregidas conciernen a las cuentas promedio entre el factor de decaimiento  $e^{-\lambda t}$  este factor se toma en cuenta ya que la actividad concentrada ha decaído desde el día de recolección de muestra hasta el día de su lectura; la actividad de cada filtro se calculó como el cociente de las cuentas netas y el factor de eficiencia. También se pueden observar en las **tablas #7 y #8** que los coeficientes de variación de las cuentas obtenidas de cada filtro están por debajo del 6%, indicándonos que nuestras mediciones son confiables.

Todos los factores antes mencionados se tomaron en cuenta para el cálculo de la concentración derivada en aire para  $^{131}\text{I}$ , siendo este el objetivo principal del presente trabajo. Para el cálculo de la DAC se sustituyó en la ecuación 6 mostrada en el acápite 4.4.2, donde las cuentas utilizadas son las cuentas netas.

Los siguientes gráficos corresponden a las **Tablas #7 y #8** respectivamente, para observar de mejor manera el comportamiento de las diferentes zonas evaluadas y así poder determinar las zonas de mayor concentración de  $^{131}\text{I}$  del servicio de medicina nuclear.

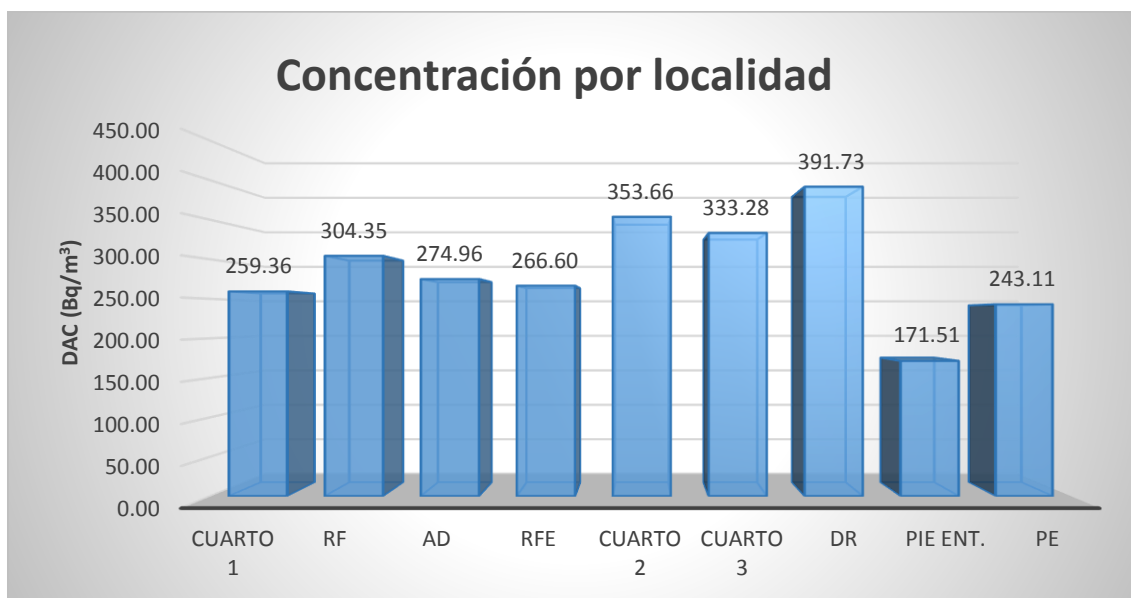
**Grafica #4.** DAC correspondiente al primer día de muestreo.



En esta grafica se puede observar que el punto de mayor concentración fue la entrada de pasillo interno (PIE ENT) debido a que en el momento que se realizaba el muestreo, el paciente que estaba ingresado en el cuarto 1 se acercó a la puerta; en el caso de

radiofarmacia se puede observar que en la entrada hay mayor concentración que la obtenida en el interior, esto se debe primeramente a que la cabina laminar tiene como función succionar la remanencia del  $^{131}\text{I}$  y a esto se le suma que el fraccionamiento del  $^{131}\text{I}$  se realizó aproximadamente 5 horas antes del monitoreo; el punto de menor concentración corresponde al pasillo externo (PE) ya que en condiciones normales esta menos expuesto a contaminación por  $^{131}\text{I}$ .

**Grafica #5.** DAC correspondiente al segundo día de muestreo.



En la gráfica #5 desechos radiactivos (DR) es la zona con mayor concentración; seguido de los cuartos 1 y 2 que estaban con pacientes, en el cuarto 3 no se encontraba paciente, pero estaba contaminado. En el segundo día a diferencia del primero el monitoreo se realizó 2 horas después del fraccionamiento por esta razón en radiofarmacia (RF) tiene una concentración mayor que radiofarmacia entrada (RFE).

## X. Conclusiones

- ✚ Se estableció un factor de eficiencia que podrá ser utilizado por el LAF-RAM para la determinación de la concentración derivada en aire (DAC) de  $^{131}\text{I}$  para el nuevo servicio que estará asociado al Laboratorio de Control de Calidad y Monitoreo (LCM).
- ✚ Se logró evaluar la DAC de  $^{131}\text{I}$  en diferentes puntos del servicio de medicina nuclear del CNR, encontrando que la concentración en los diferentes puntos de medición se encuentra por debajo del límite recomendado por la OIEA que es de  $416,67 \text{ Bq/m}^3$ .
- ✚ La zona de mayor concentración encontrada fue desechos radiactivos con una DAC de  $391,73 \text{ Bq/m}^3$  este punto de medición es el más cercano al límite, sin embargo, está justificado ya que en condiciones normales siempre va haber remanencia de  $^{131}\text{I}$ .
- ✚ Se elaboró un instructivo técnico el cual explica paso a paso como realizar un monitoreo de aire en medicina nuclear y el cálculo de la concentración.

## **XI. Recomendaciones**

- ✚ Que los centros que ofrezcan servicios de Medicina Nuclear en el país implementen un constante monitoreo a partir de la determinación de concentraciones derivadas en aires debido al  $^{131}\text{I}$ .
  
- ✚ Que se establezca un periodo de muestro semestral en los servicios de medicina nuclear para dar mayor cobertura de monitoreo a su puesto de trabajo.
  
- ✚ Utilizar el monitoreo de DAC como una herramienta alterna para la estimación de incorporación de radionucleidos por los trabajadores ocupacionalmente expuestos.

## XII. Referencias Bibliográficas

- Autoridad regulatoria Nuclear . (2000). Curso de Radioprotección en las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes. Buenos Aires, Argentina.
- Brosed Serreta, A., & Puchal Añé, R. (2014). Fundamentos de física Médica. En *Medicina nuclear: bases físicas, equipos y control de calidad* (Vol. 6). España: ADI Servicios Editoriales.
- Brosed Serreta, A., Ferrer García, N., & Paredes garcía, M. C. (2016). Fundamentos de Física Médica. En *Protección radiológica hospitalaria* (Vol. 7). España: ADI Servicios Editoriales.
- Browning, E., Banerjee, K., & Reisinger, W. (1978). Airborne concentration of I-131 in a nuclear Medicine Laboratory. *The Journal of Nuclear Medicine*, 1078-1081.
- Cadena Nogales, P. (2017). *Elaboración de filtros de carbón activado y evaluación de la eficiencia en el monitoreo ambiental del yodo molecular 131 en el área de medicina nuclear del hospital andrade marín*. Riobamba, Ecuador.
- Consejo de seguridad nuclear. (2013). *Conceptos Básicos en Dosimetría Interna*. Madrid, España: Cofás, S. A.
- Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México. (2010). *Producción de radioisótopos para aplicaciones en la salud*. México: Edición Conmemorativa.
- Di Trano , J., Rojo, A., Kunst, J., Saule, F., Ponce, L., & Fruttero, N. (s.f.). Revisión de la protección radiológica en medicina nuclear y análisis de nuevas técnicas médicas. *Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN)*, 103-150.
- Ferdous, J., Sharmin, N., Begum, A., & Begum, A. (2017). Airborne Radioactivity in Hot Lab of Nuclear Medicine. *Journal of Scientific Research*, 159-166. Obtenido de [www.banglajol.info/index.php/JSR](http://www.banglajol.info/index.php/JSR)
- Herrera V., Mayorga M., Gutiérrez K. (2019). *Protocolo para medir contaminación de aire dentro de un servicio de medicina nuclear*. Managua, Nicaragua.

Jiemwutthisak, P., Sritongkul, N., Chaudakshetrin, P., Kanchanaphiboon, P., & Tuntawiroon, M. (2012). *Air Monitoring to Control the Intake of Airborne Radioiodine-131*. Bangkok, Tailandia.

Kays666. (s.f.). *wikipedia*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Yodo-131>

Organismo Internacional de Energía Atómica. (1997). *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación*. Viena, Austria: OIEA.

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2004). *Evaluación de la exposición ocupacional debida a incorporaciones de radionucleidos*. Viena, Austria: OIEA.

Pérez Porto , J., & Gardey, A. (2013). *Definición. de*. Obtenido de <https://definicion.de/monitoreo/>

Pérez Zeledón R., M. Y. (2019). *Calibración de un sistema de Yoduro de Sodio [NaI(Tl)] para medición de concentración derivada en aire (DAC) con filtros de carbón activado*. Managua: laboratorio de Física sw Radiaciones y Metrología (LAF-RAM); UNAN, Managua; Centro Nacional de Radioterapia (CNR).

Pérez Zeledón, R. (2016). *Espectrometría Ambiental In – Situ, utilizando detectores de Germanio Híper Puro [Ge (HP)] y Yoduro de Sodio (NaI)*. Buenos Aires, Argentina: UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES FACULTAD DE INGENIERÍA.

Sevilla, U. (2010). *Manual del Carbón Activo*. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38924321/Manual\\_del\\_carbon\\_activo.pdf?1443500362=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DManual\\_del\\_Carbon\\_Activo\\_1.pdf&Expires=1591383947&Signature=RIHrh34lA1a11bAKghkhkXDGjKvbA6UQq27Euhl5mkqogP~TL3jxC8MmI](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38924321/Manual_del_carbon_activo.pdf?1443500362=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DManual_del_Carbon_Activo_1.pdf&Expires=1591383947&Signature=RIHrh34lA1a11bAKghkhkXDGjKvbA6UQq27Euhl5mkqogP~TL3jxC8MmI)

Surveillance of the activity concentrations of airborne radioactive substances in the workplace of nuclear facilities (ISO 16639). (2017). Switzerland.

## Anexo 1: Cronograma de actividades

### Actividades 2019

| ACTIVIDADES                       | Abril |   |   |   | Mayo |   |   |   | Junio |   |   |   | Julio |   |   |   | Agosto |   |   |   |
|-----------------------------------|-------|---|---|---|------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|--------|---|---|---|
|                                   | 1     | 2 | 3 | 4 | 1    | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1      | 2 | 3 | 4 |
| Revisión Bibliográfica            |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |        |   |   |   |
| Mediciones                        |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |        |   |   |   |
| Procesamiento de datos y análisis |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |        |   |   |   |

### Actividades 2020

| ACTIVIDADES                          | Septiembre |   |   |   | Octubre |   |   |   | Noviembre |   |   |   | Diciembre |   |   |   | Enero |   |  |
|--------------------------------------|------------|---|---|---|---------|---|---|---|-----------|---|---|---|-----------|---|---|---|-------|---|--|
|                                      | 1          | 2 | 3 | 4 | 1       | 2 | 3 | 4 | 1         | 2 | 3 | 4 | 1         | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 |  |
| Solicitud aprobación tema            |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |
| Redacción de Protocolo               |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |
| Revisión de Protocolo                |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   | - |           |   |   |   |       |   |  |
| Entrega de Protocolo Final           |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |
| Redacción de Documento de Monografía |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |
| Revisión                             |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |
| Incorporación de Revisiones          |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |
| Entrega Documento Final              |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |
| Defensa Monográfica                  |            |   |   |   |         |   |   |   |           |   |   |   |           |   |   |   |       |   |  |

## Anexo 2: Presupuesto

| Descripción   | Cantidad | Costo por<br>unidad (Dólares) | Costo Total<br>(Dólares) |
|---|----------|-------------------------------|--------------------------|
| Caudalímetro digital de bajo volumen de aire Dechado; Carro montado con variable característica de muestra de altura. Pantalla digital de caudal, tiempo transcurrido y volumen totalización Puerto de comunicación RS232 230 V; 1/4 H.P. | 1        | 2, 750.00                     | 2, 750.00                |
| Porta filtros Combinación de plástico, Cara abierta, partículas de 47 mm – Modelo C 3/8 "FNPT.  | 1        | 126.00                        | 126.00                   |
| Desconexión rápida macho, montaje 3/8 " MPT X estándar de la industria para baja Conexión del porta filtro de volumen.  | 1        | 7.50                          | 7.50                     |
| Cartucho de carbón TEDA D = 2.26 "+/- .01 "H = 1.05" +/- .01 "20X40 Malla Envoltura de plástico   | 100      | 5.81                          | 581.00                   |
| Papel de filtro de fibra de vidrio - 47 mm Diámetro: 100 discos por caja. Analítico grado. Moderadamente alta eficiencia papel de filtro de fibra de vidrio de borosilicato para aplicaciones de filtración de aire o agua.               | 3        | 48.00                         | 144.00                   |
| Gastos de envío y seguro  | 1        | 1, 100.00                     | 1, 100.00                |
| Transporte  | -        | -                             | 12.00                    |
| Tiempo del tutor  | -        | -                             | 380.00                   |
| <b>Total</b>  | -        | -                             | <b>5, 100.50</b>         |



### Anexo 3: Instructivo técnico para llevar a cabo el monitoreo de aire de <sup>131</sup>I en servicios de medicina nuclear del país

El presente instructivo muestra el procedimiento a seguir para el uso correcto del flujómetro de recolección de muestras, posicionamiento de los filtros para recolección de muestra, proceso de obtención y análisis de espectros.

#### a) Instrucciones generales de uso del flujómetro.

Para comprender el uso de este equipo utilizamos el manual “Medidor de Flujo Digital” (DFM), donde describe que el equipo consta solamente de cuatro botones: ON/OFF (encendido/apagado), UNITS, RESET y SET UP. Los cuales están posicionados de la siguiente manera:



*Ilustración 13: Medidor de Flujo Digital (DFM)*

**ON-OFF:** Se encuentra en la esquina superior derecha del módulo DFM. Al presionar el botón de encendido/ apagado mientras el muestreador de aire está conectado a la línea de alimentación, pero no funciona, la unidad se pondrá en modo de espera. La alimentación está habilitada para el DFM.

**RESET:** Se encuentra en la esquina inferior derecha del módulo DFM. El botón RESET se utiliza para iniciar y detener el muestreador de aire, para comenzar un evento de muestreo o para finalizar un evento de muestreo. El DFM debe estar en modo de flujo para funcionar como botón de encendido y apagado de la bomba.

El tiempo transcurrido acumulado y el volumen total acumulado no se reestablecen automáticamente a cero cuando se inicia la toma muestra de aire. Esta característica permite al operador suspender temporalmente el muestreo por mantenimiento e incrementar una configuración diferente o habilitar diferentes características.

En el modo de visualización de tiempo, presionar el botón RESET pone a cero el tiempo transcurrido. En el modo de volumen total, el botón RESET pone a cero el volumen total.

**UNITS:** Está ubicado en el lado derecho del módulo DFM. Al presionar el botón UNITS, el operador puede mostrar el flujo, el tiempo transcurrido o el volumen total haciendo avanzar el LED verde a las diferentes posiciones.

Presionar el botón UNITS una vez se mueve a la posición de tiempo en DD. HH: MM (modo días- horas- minutos). Al presionar el botón UNITS cuando el LED verde está en la posición TIME avanza a la posición TOTAL VOLUME.

***Nota:*** no suponga que el volumen total y el tiempo trascurrido son cero cuando el flujo es cero. Verifique tanto el tiempo trascurrido como los valores de volumen total antes de comenzar un evento de muestra.



***Ilustración 14:*** Posiciones del LED para cada unidad.

En el modo de visualización y tiempo, los dos puntos (:) parpadean cuando se gira el motor y se ilumina continuamente cuando la muestra de aire está en estado de espera. Los dos puntos parpadeantes también indican que la acumulación de tiempo transcurrido está en progreso.

**SET UP:** Está ubicado en el lado izquierdo del DFM. El botón SET se utiliza para configurar habilitar o deshabilitar una o todas las funciones disponibles que se enumeran a continuación:

- Apagado automático a tiempo.
- Apagado automático por volumen.
- Selección de frecuencia de datos.
- Selección de flujo o de referencia.

*Nota: El botón SET también se puede usar para detener una muestra y verificar la configuración de las funciones. El motor volverá a arrancar automáticamente cuando el DFM vuelva a modo normal.*

#### ***b) Instrucciones de uso del equipo***

##### ***Apagado automático en función de tiempo.***

**OFFT:** “Y” o “N” aparece en la pantalla. Tiene la opción de deshabilitar temporalmente esta función presionando el botón UNITS o RESET para cambiar la “Y” a una “N”.

La pantalla de configuración de la hora muestra hhh: mm (horas: minutos), cualquier valor de hora se puede configurar de 0:01 a 168:00 h: min.

- Establezca el valor de los minutos, presione el botón UNITS para aumentar el valor de los minutos o RESET para disminuir.
- Presione el botón SET para pasar a la pantalla de configuración de hora. Presione el botón UNITS para aumentar el valor de las horas o RESET para disminuir.

*Nota: si el valor de las horas ha cambiado presionar el botón SET permite al usuario volver a la pantalla de configuración de minutos.*



*Ilustración 15: “Y” y “N” que aparecen en la pantalla*



*Ilustración 16: Ejemplo de tiempo establecido en 15 min.*

- Presione el botón SET para pasar a la siguiente función.

***Apagado automático en función de volumen.***

**OFFV:** “Y” o “N” aparece en la pantalla. Tiene la opción de deshabilitar temporalmente esta función presionando el botón UNITS o RESET para cambiar la “Y” a una “N”.

Cualquier valor de volumen se puede configurar de 0.01E00 a 9.99E99.

***Nota:*** La “V” en “OFF” es en realidad una “U”. Esto se debe a los segmentos de la pantalla LED.

- Establezca el valor del exponente primero. Presione el botón UNITS para aumentar el valor del exponente o RESET para disminuir.

- Presione el botón SET para moverse a la pantalla de configuración de dígitos. Presione el valor UNITS para aumentar el valor de los dígitos o RESET para disminuir.

*Nota: Si los dígitos a la derecha del punto decimal han cambiado, presionar SET lleva al usuario a la pantalla de configuración del exponente.*

- Presionar SET para pasar a la siguiente función.



*Ilustración 17: “Y” y “N” que aparecen en la pantalla.*

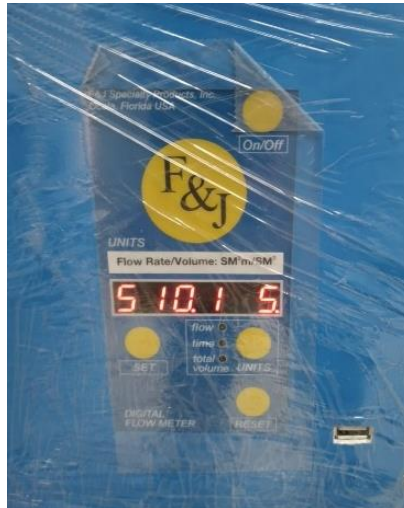


*Ilustración 18: Ejemplo de volumen establecido.*

*Nota: La función de apagado automático en volumen generalmente no está habilitada si se ha habilitado el apagado automático a tiempo, sin embargo, es físicamente posible tener ambos habilitados. La función de cierre que es más restrictiva ocurrirá primero y, por lo tanto, terminará el evento de muestreo.*

***Selección de la característica de frecuencia de datos en serie.***

**SIO:** 1s, 1min, 6min o 1h aparece en la pantalla. Presione el botón UNITS o RESET para cambiar la frecuencia con la que se enviarán los datos a un dispositivo de almacenamiento de dato. Presione el botón SET para avanzar a la siguiente función.



***Ilustración 19: Ejemplo de frecuencia de almacenamiento a 1s.***

***Selección de la función de flujo ambiental o de referencia.***

El operador solo puede cambiar de una medición de flujo de referencia a una medición ambiental cuando el valor del volumen acumulado es cero. Este requisito garantiza que los volúmenes ambientales no se mezclan con los volúmenes de referencia durante cualquier evento de muestra. Si la acumulación de volumen no es cero, la opción aparecerá en la pantalla de configuración.

El operador debe presionar el botón ON/OFF para poner a cero el volumen total y todas las demás acumulaciones, o debe situar la LED verde en la posición de volumen y presionar el botón RESET para poner a cero el volumen. Cualquiera de las dos acciones anteriores indica la intención de terminar el evento de muestra antes de cambiar el tipo de flujo previamente programado en DFM.

**Anb.F:** “Y” o “N” aparece en la pantalla. Presionar el botón UNITS o RESET para cambiar este valor. Seleccionar “Y” proporciona lecturas de flujo ambiental en la pantalla. Seleccionar “N” proporciona lectura de flujo de referencia en la pantalla. Presione el botón SET para avanzar a guardar.





*Ilustración 20: “Y” y “N” que aparecen en la pantalla.*

***Guardar la configuración.***

**SAVE:** “Y” aparece en la pantalla si ha realizado cambios en la configuración. Si no se realizaron cambios, el programa vuelve al modo de visualización normal.

- Presione los botones UNITS o RESET para cambiar de “Y” a “N”.
- Presione el botón SET para guardar los cambios. DONE aparece en la pantalla brevemente luego vuelve a modo de visualización normal.

***Suspensión temporal de la actividad de la muestra.***

- Con UNITS en modo de flujo, presione el botón RESET para apagar el botón de la bomba. El operador almacena el tiempo transcurrido acumulado y el volumen acumulado hasta el momento de la suspensión.

***Nota:*** El tiempo transcurrido no se cuenta cuando el motor de la bomba está apagado. El valor de volumen total está congelado por que el flujo es cero cuando el motor de la bomba está apagado.

- Con UNITS en el modo de flujo, presione el botón RESET para reanudar la actividad de muestra.

***Terminación de una actividad de muestra.***

- Con UNITS en el modo de flujo, presione el botón RESET si la bomba está funcionando. Esto apaga el botón de la bomba y conserva el tiempo transcurrido y los valores de volumen total.
- Obtenga y registre tiempo transcurrido y los valores de volumen total.
- Presione el botón ON/OFF para desconectar la alimentación del DFM.

- Retire los filtros de la porta filtro para análisis de laboratorio.

**c) Instrucciones para la recolección de muestras.**

- Al realizar el monitoreo de área primero se clasifican en conjunto con el encargado del área a monitorear los puntos donde pueda haber una contaminación.
- Previamente el equipo se tiene que envolver con plástico para evitar una posible contaminación dejando descubierta la parte donde se ubica el filtro.
- El filtro de carbón activado debe de colocarse en la boquilla del flujómetro de manera que las flechas queden apuntando hacia adentro.



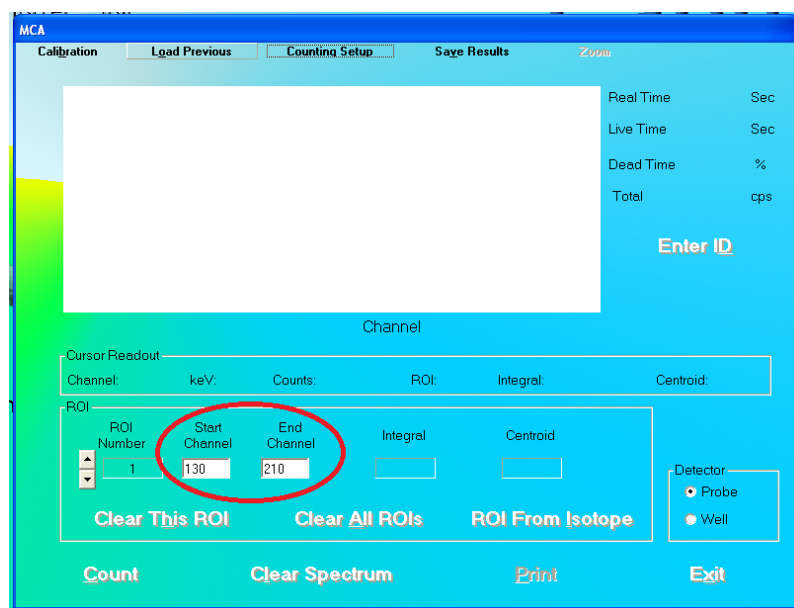
**Ilustración 21:** Colocación del filtro en el flujómetro.

- Se coloca un filtro diferente para el análisis individual de cada punto.
- Se determina el tiempo previsto.
- Para el cambio de cada filtro siempre se usan guantes diferentes, y cada uno se deposita en bolsas separadas.
- Utilizar una caja con separaciones que permita diferenciar cada filtro de cada punto de medición.



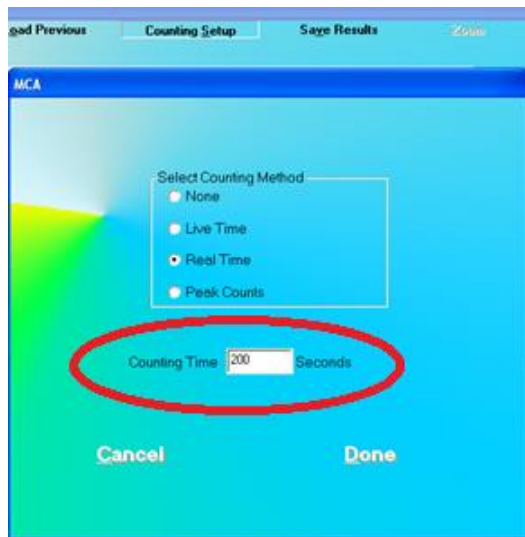
## Análisis de los filtros:

- ❖ Inicialmente se realiza una constancia del espectrómetro CAPTUS 3000 para verificar que el equipo este en óptimas condiciones con fuentes patrones de  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{152}\text{Eu}$ , siguiendo los pasos recomendados por la auto calibración del detector.
- ❖ Seleccionar en el menú principal del software del detector la opción de MCA, la cual permite utilizar el analizador multicanal del equipo.
- ❖ Para el análisis de cada filtro se debe de setear el programa del equipo CAPTUS 3000 con la siguiente configuración, para una región de interés que dé cobertura a las emisiones detectadas entre los canales 130 al 210.



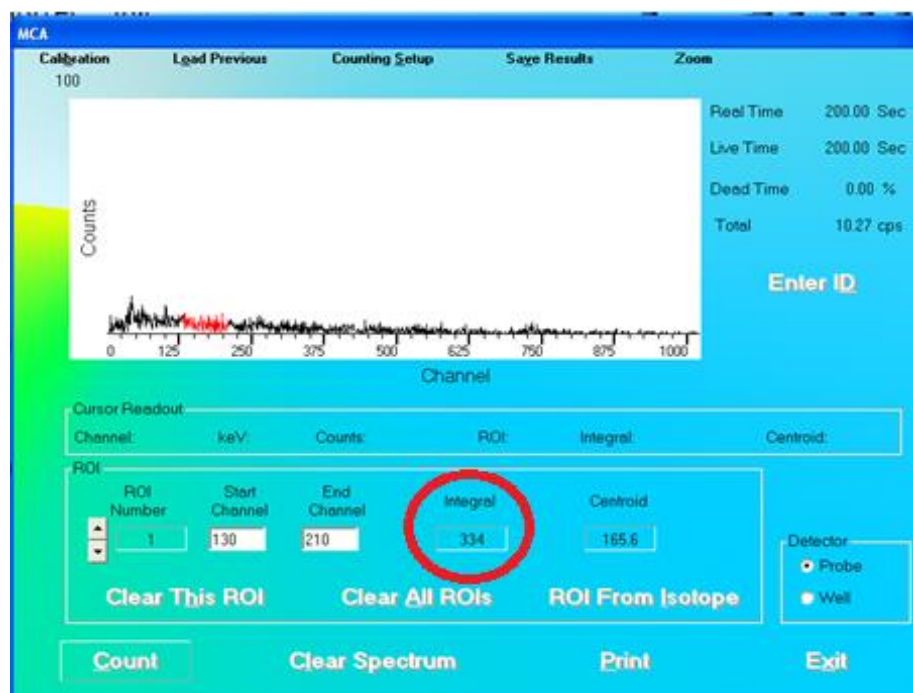
*Ilustración 22: Canales utilizados*

- ❖ Para el establecimiento del tiempo de medición para los filtros, se debe de seleccionar Configuración de conteo (Counting Set up) y establecer como tiempo real un valor de 200 segundos, a como se observa en la siguiente imagen:



*Ilustración 23: Tiempo real de conteo.*

- ❖ Realizar tres conteos sin filtro para anotar valores de fondo (valor mostrado en el cuadro integral), en el formato de toma de datos.



*Ilustración 24: Cuadro integral de cuentas fondo.*

- ❖ Una vez realizadas las mediciones de fondo colocar el filtro en una superficie plana con una geometría que tenga una distancia detector – filtro de 18 cm, se debe de asegurar que el detector este alineado con el centro del filtro, a como se observa en la *ilustración 11*.

- ❖ Una vez establecida la geometría de medición, proceder a recolectar 10 espectros por filtro recolectado, anotando el valor de la integral, así como la hora de medición, en la hoja de toma de datos.

### Cálculo de la Concentración derivada en aire (DAC):

En la hoja de cálculo se deben de contar con los siguientes datos:

|   |        |
|---|--------|
| <b>T 1/2: Tiempo Vida Media [h]</b>         | 192,96 |
| <b>λ: Constante de decaimiento[1/h]</b>     | 0,004  |
| <b>E: Factor de Eficiencia [cuentas/Bq]</b> | 0,409  |
| <b>V: Volumen Extraído [m³]</b>             | 0,22   |

Vida media del isotopo a monitorear.

Constante de decaimiento del isotopo a monitorear.

Factor obtenido de la calibración con filtro de calibración.

Volumen anotado del flujómetro.

Para la obtención del valor de concentración derivada en aire es necesario contar con los siguientes valores:

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| <b>Promedio Cuentas</b>        | 327              |
| <b>Fecha/Hora Reco.</b>        | 2019-11-04 14:23 |
| <b>Fecha/Hora Med.</b>         | 2019-11-05 10:55 |
| <b>Tiempo transcurrido (h)</b> | 20.53            |
| <b>Cuentas Corregidas</b>      | 351              |
| <b>Cuentas Netas</b>           | 6                |
| <b>Actividad Filtro [Bq]</b>   | 15.08            |

Promedio de cuentas de los 10 espectros obtenidos.

Fecha y Hora de recolección de muestra.

Fecha y Hora de medición de los filtros.

Tiempo transcurrido entre recolección y medición.

Corrección de promedio de cuentas por tiempo transcurrido.

Diferencia de cuentas corregidas con promedio de cuentas fondo.

Valor obtenido de la división de las cuentas netas y factor de calibración.

Las cuentas corregidas se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{\bar{C}}{e^{-\lambda t}} \quad \text{ecuación 8}$$

Donde:

- $C_c$  = Cuentas corregidas
- $\bar{C}$  = Promedio de cuentas
- $\lambda$  = Constante de decaimiento del elemento radiactivo en estudio
- $t$  = Tiempo transcurrido entre recolección y medición del filtro

La actividad del filtro se calcula a partir de la ecuación que se muestra a continuación:

$$A = \frac{C_n}{F_c} \quad \text{ecuación 9}$$

Donde:

- **A** = Actividad recolectada por el filtro
- **C<sub>n</sub>** = Cuentas netas
- **F<sub>c</sub>** = Factor de calibración del detector para la geometría de filtro utilizado.

Para la determinación de la concentración de actividad derivada en aire (DAC) se obtendrá a partir de la ecuación 6.

## Anexo 4

**Tabla #11. Coeficientes de dosis para los radionucleidos seleccionados**

| Radionucleido | Tipo/<br>forma <sup>a</sup> | Inhalación            |                      | Ingestión |                         |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------|-----------|-------------------------|
|               |                             | $e(g)_{inh}$ (Sv/Bq)  |                      | $f_1$     | $e(g)_{ing}$<br>(Sv/Bq) |
|               |                             | DAMA = 1 $\mu$ m      | DAMA = 5 $\mu$ m     |           |                         |
| Sb-125        | F                           | $1,4 \times 10^{-9}$  | $1,7 \times 10^{-9}$ | 0,1       | $1,1 \times 10^{-9}$    |
|               | M                           | $4,5 \times 10^{-9}$  | $3,3 \times 10^{-9}$ |           |                         |
| I-125         | F                           | $5,3 \times 10^{-9}$  | $7,3 \times 10^{-9}$ | 1,0       | $1,5 \times 10^{-8}$    |
|               | V                           | $1,4 \times 10^{-8b}$ |                      |           |                         |
| I-131         | F                           | $7,6 \times 10^{-9}$  | $1,1 \times 10^{-8}$ | 1,0       | $2,2 \times 10^{-8}$    |
|               | V                           | $2,0 \times 10^{-8b}$ |                      |           |                         |
| Cs-134        | F                           | $6,8 \times 10^{-9}$  | $9,6 \times 10^{-9}$ | 1,0       | $1,9 \times 10^{-8}$    |
| Cs-137        | F                           | $4,8 \times 10^{-9}$  | $6,7 \times 10^{-9}$ | 1,0       | $1,3 \times 10^{-8}$    |

(Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004, pág. 78)

**Tabla #12. Concentraciones derivadas en aire (DAC) para radionucleidos seleccionados.**

| Radionucleido | Tipo/forma <sup>a</sup> | CDA (Bq/m <sup>3</sup> ) |                  |                 |
|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|
|               |                         | DAMA = 1 $\mu$ m         | DAMA = 5 $\mu$ m | Gas/vapor       |
| I-131         | F                       | $1 \times 10^3$          | $8 \times 10^2$  | $4 \times 10^2$ |
|               | V                       |                          |                  |                 |
| Cs-134        | F                       | $1 \times 10^3$          | $9 \times 10^2$  |                 |
| Cs-137        | F                       | $2 \times 10^3$          | $1 \times 10^3$  |                 |
| Ce-144        | M                       | $2 \times 10^2$          | $4 \times 10^2$  |                 |
|               | S                       | $2 \times 10^2$          | $3 \times 10^2$  |                 |

(Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004, pág. 81)

## Anexo 5



*Ilustración 25: Impregnación del filtro de referencia con  $^{131}\text{I}$  para la calibración del sistema de detección CAPTUS 3000.*