

Programa de aseguramiento  
metrológico para detectores de  
radiación ionizante gaseosos en la  
Fundación Valle del Lili

Raúl Alexander Chamorro Tobar



**Programa de aseguramiento metrológico para detectores de radiación ionizante gaseosos en la Fundación Valle del Lili**



Universidad  
del Cauca

**Raúl Alexander Chamorro Tobar**

**Universidad del Cauca**  
**Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación**  
**Departamento de Física**  
**Popayán, Colombia**  
**2021**

# **Programa de aseguramiento metrológico para detectores de radiación ionizante gaseosos en la Fundación Valle del Lili**

**Raúl Alexander Chamorro Tobar**

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Físico

Director:

**PhD. Rubiel Vargas Cañas**

Profesor Departamento de Física - Universidad del Cauca

Codirectora:

**MSc. Nathalia Ivanovna Núñez Peláez**

Física médica - Fundación Valle del Lili

**Universidad del Cauca**

**Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación**

**Departamento de Física**

**Popayán, Colombia**

**2021**

# Nota de aceptación

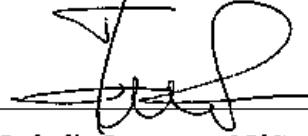
Aprobada

Director



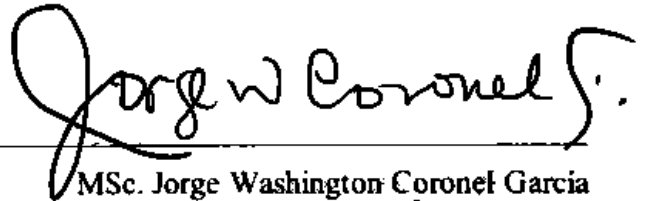
**Ph.D. Rubiel Vargas Cañas**

Codirectora



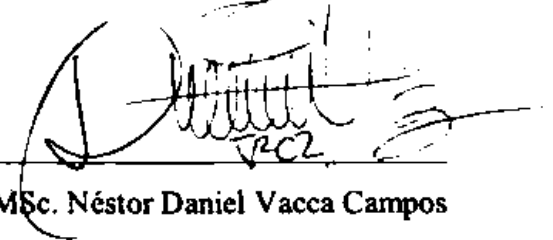
**MSc. Nathalia Ivanovna Núñez Peláez**

Jurado



**MSc. Jorge Washington Coronel García**

Jurado



**MSc. Néstor Daniel Vacca Campos**

Fecha de sustentación: Popayán, 24 de agosto de 2021

# Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme tener experiencias que han llenado mi vida de bendición y a la Virgen de Las Lajas por ser mi inspiración en muchos momentos.

Infinita gratitud a mi madre Julia Tobar Ayala y a mi hermano Diego Chamorro Tobar a quienes amo tanto y quienes en todo momento me demuestran su apoyo incondicional, gracias por motivarme a estudiar y por ser mi mayor inspiración todos los días.

A mis directores Nathalia Núñez y Rubiel Vargas por su dedicación, paciencia, por compartirme sus conocimientos y guiarme en el desarrollo de este trabajo de grado, que sin duda me hace un mejor profesional y un mejor ser humano.

A los físicos y compañeros de la Oficina de Física Médica y Protección Radiológica por estar siempre dispuestos a resolver mis inquietudes y por los buenos momentos compartidos; a los químicos de Radiofarmacia, enfermeros y tecnólogos de Radioterapia y Medicina Nuclear, y todas las personas de la Fundación Valle del Lili que hicieron parte de mi proceso formativo, gracias por su apoyo e interés para que mi experiencia en esta institución fuera la mejor.

A mis profes del colegio y de la U, por formarme e inspirarme a estudiar esta hermosa pero difícil carrera.

A mis amigos Cristina Mueses y José David Gavilanes, por manifestarme siempre su apoyo incondicional; a los compas y amigos de la U, en especial a Marce, M. Paula, Angie, Clau, Mafe, Cris, Mabel, Daniel, Julián, Alejandro (Chayo), Edwin, Evert e indiscutiblemente a Elkin Durán por la confianza, la motivación, por el aprendizaje compartido y sobre todo por su amistad; a todos mis amigos de Popayán con quienes compartí experiencias inolvidables, a los que confiaron desde el principio y que aún confían en mí, mil y mil gracias.

# Contenido

<b>Resumen.....</b>	<b>vii</b>
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Definición del problema.....	2
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Metodología .....	4
1.4 Principales contribuciones .....	6
1.5 Estructura a desarrollar .....	6
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>8</b>
<b>2 Marco teórico.....</b>	<b>8</b>
2.1 Marco conceptual.....	9
2.1.1 Radiación ionizante.....	9
2.1.2 Detección de radiación ionizante.....	11
2.1.3 Detectores de radiación.....	12
2.1.4 Detectores gaseosos .....	12
2.1.5 Cantidades y unidades .....	14
2.2 Marco normativo.....	15
2.2.1 Resolución número 482 de 2018 .....	16
2.2.2 Resolución 18-1434 de 2002 .....	16
2.2.3 NTC-ISO 10012.....	16
2.2.4 ISO/IEC/NTC 17025:20054 .....	16
2.2.5 Aseguramiento metrológico de equipos de laboratorio INS 2015.....	17
2.2.6 Guía N° 14 y Guía N° 30 buenas prácticas de medición.....	18
2.2.7 Serie de informes de seguridad N° 16 .....	18
2.2.8 Metrología.....	18
2.3 Marco procedimental .....	22
2.3.1 Contaminación superficial ( $S_A$ ) .....	22
2.3.2 Tasa de exposición radiactiva ( $\dot{X}$ ) .....	24

2.3.3	Incertidumbre de la medición .....	25
2.4	Marco referencial .....	26
2.4.1	Análisis de la literatura .....	29
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>31</b>	
<b>3</b>	<b>Metodología y materiales .....</b>	<b>31</b>
3.1	Clasificación de equipos .....	32
3.2	Descripción de los equipos y materiales .....	34
3.2.1	Sonda GM .....	34
3.2.2	Monitor de radiación de área: .....	34
3.2.3	Monitor de radiación de manos y pies: .....	35
3.2.4	Detector GM portátil:.....	35
3.2.5	Dosímetro de lectura directa: .....	36
3.2.6	Fuentes radiactivas.....	36
3.3	Montaje experimental.....	37
3.3.1	Contaminación superficial .....	38
3.3.2	Exposición ambiental y exposición personal .....	39
3.3.3	Registro de mediciones .....	40
3.4	Pruebas de verificación .....	41
3.4.1	Verificaciones rutinarias .....	42
3.4.2	Verificaciones inmediatas.....	46
3.5	Criterios de evaluación para definir la frecuencia de la verificación metrológica. 47	
3.5.1	Tiempo en servicio.....	47
3.5.2	Entorno de uso .....	48
3.5.3	Frecuencia de uso.....	49
3.5.4	Criticidad .....	49
3.6	Frecuencias de verificación.....	50
3.6.1	Extensión de intervalos de calibración .....	50
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>52</b>	
<b>4</b>	<b>Resultados y análisis.....</b>	<b>52</b>
4.1	Clasificación de Equipos.....	53
4.2	Verificaciones .....	55
4.3	Verificaciones rutinarias .....	55



4.3.1	Inspección inicial .....	56
4.3.2	Certificados de calibración .....	56
4.3.3	Constancia.....	58
4.3.4	Exactitud .....	62
4.3.5	Precisión.....	64
4.3.6	Dependencia direccional.....	66
4.4	Pruebas inmediatas.....	68
4.4.1	Inspección inicial .....	68
4.4.2	Certificados de calibración .....	68
4.4.3	Constancia.....	69
4.5	Extensión de intervalos de calibración.....	70
<b>Capítulo 5</b>	<b>.....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>73</b>
5.1	Conclusiones .....	74
5.2	Recomendaciones.....	75
5.3	Trabajo futuro.....	75
<b>6</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>83</b>
A.	Inventario de detectores de radiación gaseosos .....	83
B.	Verificaciones rutinarias .....	84
a.	Constancia.....	84
b.	Exactitud .....	86
c.	Precisión.....	89
d.	Dependencia direccional .....	93
C.	Verificaciones inmediatas .....	94
D.	Matriz de calificación intervalos de verificación e intervalos de calibración .....	96
E.	Extensión intervalos de calibración – ejemplo.....	98
F.	Costos por calibraciones .....	98
G.	Sintaxis generación código QR.....	99
H.	Formatos de registro.....	100

# Índice de figuras

Figura 3.1. Sonda GM marca Graetz, modelo 18550C.....	34
Figura 3.2. Monitor de Radiación de área marca Primalert Fluke, modelo 05-443 .....	35
Figura 3.3. Monitor de radiación de manos y pies marca Ludlum, modelo 177. ....	35
Figura 3.4. Monitor portátil de radiación tipo GM marca Fluke, modelo 993. ....	35
Figura 3.5. Dosímetro de lectura directa marca Ludlum, modelo 25-IS-1 .....	36
Figura 3.6 Medición de la contaminación superficial a) detector de radiación de manos y pies, marca Tema Sinergie, b) detector portátil Fluke 993 tipo GM.....	38
Figura 3.7. Proceso para la construcción del montaje experimental para exposición radiactiva a) boceto inicial, b) modelado en software CAD, c) impresión 3D.....	39
Figura 3.8. Montaje modular para medición de exposición radiactiva a) Accesorio para detectores fijos, b) mediciones en posición horizontal, c) mediciones en posición vertical	40
Figura 3.9 Etiqueta de marcación para verificación metrológica .....	40
Figura 3.10 Acceso al formato de cada equipo a) lectura código QR, b) formato para dispositivo móvil, c) registro pruebas online.....	41
Figura 3.11 Montaje experimental para medición de exposición radiactiva direccional. a) medidas realizadas en la ubicación 0°. b) medida realizada con una angulación de 60°. c) pieza modular giratoria que permite ajustar los ángulos de medición.....	46
Figura 4.1 Clasificación de los equipos en zonas de interacción con radiación ionizante ...	53
Figura 4.2 Clasificación de los detectores que requieren calibración.....	54
Figura 4.3 Clasificación de los DRI gaseosos por familias de equipos y su condición de uso .....	54
Figura 4.4 Distribución de detectores gaseosos de la FVL por áreas o servicios.....	55
Figura 4.5 Inspección inicial y daños .....	56
Figura 4.6 Consolidado calibración DRI .....	57
Figura 4.7 Últimas calibraciones por año .....	57
Figura 4.8 Constancia en calibraciones .....	58
Figura 4.9 Constancia en contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies .....	59
Figura 4.10 Constancia en exposición ambiental - Detector GM portátil .....	61

Figura 4.11 Constancia en exposición personal - Dosímetro de lectura directa.....	61
Figura 4.12 Exactitud en contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies .....	63
Figura 4.13 Exactitud en exposición ambiental - Detector GM portátil.....	63
Figura 4.14 Exactitud en contaminación superficial - Dosímetro de lectura directa.....	64
Figura 4.15 Precisión en contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies .....	65
Figura 4.16 Precisión en exposición ambiental - Detector GM portátil .....	65
Figura 4.17 Precisión exposición personal - Dosímetro de lectura directa.....	66
Figura 4.18 Dependencia direccional exposición ambiental - Sonda GM .....	67
Figura 4.19 Dependencia direccional exposición personal - Dosímetro de lectura directa..	67
Figura 4.20 a) Averías después de calibración detector de radiación de manos y pies marca Ludlum modelo 177, b) <i>pancake</i> rota, c) detección de fallo en mediciones antes del envío a calibración, d) desperfectos en pantalla y botones de operación para un dosímetro de lectura directa.....	68
Figura 4.21 Sondas GM no funcionales en calibración .....	69
Figura 4.22 Registros contaminación superficial salida e ingreso del equipo .....	70
Figura 4.23 Registros exposición radiactiva salida e ingreso del equipo .....	70
Figura 4.24 Nuevos periodos de calibración .....	71
Figura 4.25 Extensión de intervalos de calibración por años .....	72
Figura 7.1 Constancia contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies	84
Figura 7.2 Constancia contaminación superficial - Detector GM portátil.....	84
Figura 7.3 Constancia exposición ambiental - Sonda GM .....	85
Figura 7.4 Constancia exposición ambiental - Monitor de área .....	85
Figura 7.5 Constancia exposición ambiental - Detector GM portátil .....	85
Figura 7.6 Constancia exposición personal - Dosímetro de lectura directa.....	86
Figura 7.8 Exactitud contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies...	86
Figura 7.9 Exactitud contaminación superficial - Detector GM portátil .....	87
Figura 7.10 Exactitud exposición ambiental - Sonda GM.....	87
Figura 7.11 Exactitud exposición ambiental - Monitor de área.....	88
Figura 7.12 Exactitud exposición ambiental - Detector GM portátil .....	88

Figura 7.13 Exactitud exposición personal - Dosímetro de lectura directa .....	89
Figura 7.14 Precisión contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies .	89
Figura 7.15 Precisión contaminación superficial - Detector GM portátil.....	89
Figura 7.16 Precisión exposición ambiental detectores fijos - Monitor de área.....	90
Figura 7.17 Precisión exposición ambiental - Detector GM portátil .....	90
Figura 7.18 Precisión exposición personal - Dosímetro de lectura directa.....	91
Figura 7.19 Dependencia direccional exposición ambiental - Sonda GM .....	93
Figura 7.20 Dependencia direccional exposición ambiental - Monitor de área .....	93
Figura 7.21 Dependencia direccional exposición ambiental - Detector GM portátil .....	93
Figura 7.22 Dependencia direccional exposición personal - Dosímetro de lectura directa..	94
Figura 7.23 Constancia contaminación superficial detectores fijos – Ingreso .....	94
Figura 7.24 Constancia contaminación superficial detectores portátiles – Salida.....	95
Figura 7.25 Constancia contaminación superficial detectores portátiles - Ingreso .....	95
Figura 7.26 Constancia exposición radiactiva detectores portátiles – Salida .....	95
Figura 7.27 Constancia exposición radiactiva detectores portátiles - Ingreso.....	96

## Resumen

Un recurso para el continuo mejoramiento de la calidad en los diferentes servicios de salud de la Fundación Valle del Lili, donde la radiación ionizante es usada tanto en diagnóstico como en tratamiento, se logra mediante el aseguramiento metrológico de la instrumentación empleada, por ejemplo, para los detectores Geiger Müller, en ellos, se busca asegurar su buen funcionamiento, y cumplir así con los requerimientos legales, garantizar la protección radiológica del ambiente y de las personas. La verificación de estos detectores, permitió analizar el comportamiento, ante fuentes radiactivas certificadas de Cs-137, teniendo en cuenta la geometría más adecuada, para magnitudes como contaminación superficial y exposición radiactiva, para esta última se consideró valor de referencia de una fuente cilíndrica, que representa una geometría real, la cual tuvo una diferencia del 5,24 uSv/h equivalente a 10,74%, en comparación con la aproximación para una fuente puntual. Se evaluó la respuesta de 50 detectores de este tipo, para conocer su adecuado funcionamiento, el cual, debe encontrarse dentro del  $\pm 30\%$  de la respuesta esperada, para el análisis retrospectivo en los resultados de calibraciones anteriores debe encontrarse dentro del  $\pm 20\%$ , estos procesos se implementaron en el 90% de los detectores en estudio de los cuales se logró la extensión de los intervalos de calibración para 24 equipos. El análisis de todos los resultados, permitió soportar y fortalecer la decisión de extensión de los intervalos de calibración, sin afectar el desempeño de los detectores.

# Capítulo 1

## Introducción

En muchos campos donde se utiliza radiación ionizante, es fundamental contar con equipos, que permitan medir los niveles de exposición y/o contaminación ante este tipo de radiación; estos equipos deberán contar con las especificaciones requeridas para la práctica donde se empleen, tanto en el campo clínico como en estudios de investigación [1]. Existen muchas fuentes de exposición a la radiación, tanto naturales como artificiales, donde el 19,79% de las contribuciones a la dosis media anual, corresponden a las exposiciones médicas [2], de modo que todas las entidades de asistencia médica y sanitarias que intervengan en exposiciones médicas, deben coordinar sus actividades, para conseguir el nivel requerido de protección y seguridad radiológica [3]. Por lo cual, existe un interés en monitorear los detectores, que permiten reconocer y cuantificar la radiación ionizante presente en el entorno.

### **1.1 Definición del problema**

Los resultados de los procesos de medición deben ser garantizados, esto se logra implementando procesos de confirmación metrológica, de manera que se asegure, se demuestre, controle, mantenga y documente el adecuado estado de los equipos e instrumentos de medición para su uso. En ese orden de ideas, la gestión correcta de los procesos de medición, y las operaciones de confirmación metrológica de los instrumentos, son necesarias para demostrar el cumplimiento de los requisitos de aseguramiento metrológico. El análisis de estos procesos, permite determinar si realmente se cumple con las especificaciones requeridas, además, es importante definir las frecuencias de calibración y verificación, para ejecutar los procesos que demuestren que sus medidas son correctas, y de esta manera se tenga certeza en los valores que estos arrojan. Estos detectores son calibrados en diferentes modos según su aplicación, por ejemplo, para monitoreo de área se mide dosis equivalente ambiental ( $H^*(10)$ ) en Sv/h o R/h, para monitoreo individual se realizan mediciones de dosis equivalente personal ( $H_p(10)$ ) en Sv/h y para contaminación superficial ( $S_A$ ) las mediciones se muestran en cuentas por segundo (cps) o actividad por unidad de área ( $Bq/cm^2$ ) [4], [5], [6].

En Colombia, el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD) del Servicio Geológico Colombiano, se encarga de verificar la correcta calibración de estos instrumentos, pero los responsables de las prácticas, son quienes deben asegurar ante los entes reguladores

nacionales, que la instrumentación con que cuentan para medir radiación ionizante, presente datos confiables [7]. Además, existe una brecha en la capacidad del país para calibrar, para el año 2019 el LSCD realizó cambios en su infraestructura y en su capacidad instalada, y el número de usuarios de sus servicios va en aumento, lo que ha llevado que las frecuencias de calibración de los instrumentos de la Fundación Valle del Lili (FVL), se vean afectadas y se planteen así, soluciones para la calibración, como el envío de los equipos a laboratorios de calibración extranjeros, acarreando sobrecosto, daños durante el transporte [8], pérdida de la mercancía, entre otros. En muchos países, se adopta la normativa internacional CEI<sup>1</sup>, que permite elaborar metodologías, que sirven de guía para garantizar el buen funcionamiento de esta clase de equipos. En algunos centros médicos, por ejemplo en Italia [9] estas guías tienen instrucciones que definen los equipos a evaluar, condiciones de las pruebas, y las características de desempeño para su implementación. También existen organismos de orden internacional, como la comisión canadiense de seguridad nuclear (CNSC), y el laboratorio nacional de física por sus siglas en inglés *National Physicl Laboratory* (NPL) del Reino Unido, organismos encargados, de la elaboración de guías para el buen uso de detectores de radiación ionizante. La FVL, presta los servicios de radioterapia, braquiterapia, medicina nuclear, radiofarmacia, imágenes diagnósticas. La Oficina de física médica y protección radiológica (OFM&PR), es la encargada, de evaluar las condiciones de funcionamiento, de los equipos que trabajan con radiación ionizante. La escasez y capacidad operativa de laboratorios de calibración para equipos de radiación ionizante en Colombia, llevó a proponer el desarrollo e implementación, del programa de aseguramiento metrológico para detectores de radiación ionizante gaseosos tipo Geiger Müller (GM), en las instalaciones de la FVL el cual responde a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo optimizar los procesos de confirmación metrológica en los detectores de radiación ionizante gaseosos, y qué implementación es la más eficiente y adecuada para la Fundación Valle del Lili?

---

<sup>1</sup> CEI: Comisión Electrotécnica Internacional



## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Establecer un programa para el aseguramiento metrológico de equipos detectores de radiación ionizante gaseosos en la Fundación Valle del Lili.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar los equipos detectores de radiación ionizante gaseosos de referencia, intervalos de medición, tolerancias y las condiciones ambientales para el desarrollo del programa de aseguramiento metrológico.
- Identificar las condiciones óptimas de funcionamiento, almacenamiento, frecuencias de evaluación de los detectores de radiación ionizante gaseosos, de acuerdo a recomendaciones nacionales e internacionales
- Estructurar el programa de aseguramiento metrológico, para el estudio del comportamiento de los detectores de radiación ionizante gaseosos.
- Desarrollar el plan de aseguramiento metrológico para al menos el 50% de los detectores de radiación ionizante gaseosos.

## **1.3 Metodología**

La metodología empleada fue de tipo experimental, de manera que permitiera alcanzar el objetivo principal, atendiendo los requisitos y las orientaciones para la implementación de sistemas de gestión de las mediciones. Para el correcto desarrollo de este trabajo, se planteó una metodología que se llevó a cabo en cinco etapas:

- Inicialmente se indagó sobre el funcionamiento de los equipos, realizando la lectura de los manuales de operación y toda la documentación que permitió comprender mejor este tipo de detectores, se realizó una preselección de los equipos, luego, se definieron los equipos que fueron objeto del plan de aseguramiento metrológico, posteriormente se organizó el inventario, en el que se anexó las características más importantes de cada instrumento, basados en los manuales operativos y/o datasheet de los sensores, que definen el tipo de detector. Con la información recopilada, se clasificaron los equipos por

grupos según su modo de operación. También, se consideraron las condiciones ambientales en las que operan adecuadamente los equipos (Anexo A).

- Seguidamente, se realizó la búsqueda de las diferentes metodologías de medición para detectores de radiación ionizante gaseosos, al igual que las normativas nacionales e internacionales, que orientaron en la elaboración de la secuencia a llevar a cabo en el aseguramiento metrológico. Se tomó como base, las metodologías existentes en estudios de mediciones ante fuentes radiactivas, como Claudia Regio e colaboradores [10] en su estudio denominado “*Impact evaluation of the geometry on measurements of solid radioactive waste exposure rates in nuclear medicine*”; Nataly Barbosa y colaboradores [11] en su estudio “*Routine constancy tests of Geiger-Müller detectors in nuclear medicine and radiopharmacy - Instituto Nacional de Cancerología: A quality assurance proposal for radiation protection equipment*”; Lee y Burgess en la guía “*The Examination, Testing and Calibration of Portable Radiation Protection Instruments, Assessment*” [12], [13]; las metodologías indicadas, se analizaron y se adaptaron a la instrumentación de la institución.
- Acto seguido, se estructuró el programa de aseguramiento metrológico, donde se elaboró la documentación necesaria, con la metodología implementada en las pruebas de verificación para los detectores de radiación ionizante gaseosos tipo GM (Anexo I).
- Después, se desarrolló el programa construido para los detectores en estudio, se realizaron mediciones con los equipos más representativos de cada grupo preseleccionado, utilizando fuentes de radiación de referencia Cs-137 [4], [5], [14], [15] con las que cuenta la institución. Se comenzó con las pruebas a los equipos que cuentan con certificado de calibración vigente y posteriormente se extendió a más instrumentos.
- La organización de los datos recolectados permitió realizar su análisis de tal manera que al compararlos con los valores de referencia, se pudo evaluar el buen estado de los equipos, estos resultados soportan la extensión de sus intervalos de calibración (Anexo B).

#### **1.4 Principales contribuciones**

Este trabajo fortalece las operaciones de confirmación metrológica, aportando una evidencia objetiva del buen funcionamiento de los detectores de radiación ionizante (DRI) gaseosos tipo GM en la FVL, demostrando que satisfacen los requerimientos necesarios para su funcionamiento, reduciendo el riesgo de que el equipo opere fuera de las condiciones óptimas de trabajo, estas herramientas permiten asegurar, y dar confiabilidad en los resultados que se obtienen, en el tiempo de uso directo de los equipos, lo anterior enmarcado en la política de garantía de calidad institucional. De esta manera, se asegura que la cuantificación y monitoreo de la cantidad de radiación impartida en el ambiente, en los pacientes y en los trabajadores expuestos, se identifica adecuadamente para conocer, si la radiación ionizante, se encuentra bajo los rangos permitidos, aportando significativamente de esta manera, en el cuidado y la protección radiológica para los servicios clínicos como: medicina nuclear, radioterapia, radiofarmacia, entre otros; según lo establece el ministerio de salud y protección social [7].

Respecto al programa de Ingeniería Física, el trabajo de investigación realizado en las instalaciones de la FVL, permitió seguir explorando un campo que es relativamente nuevo para estudiantes y egresados, de tal manera que permitió adquirir, reforzar y profundizar los conocimientos de la física, aplicada a la medicina, y se continúa explorando áreas diferentes a las de la formación académica en la Universidad del Cauca, posibilitando el acercamiento a equipos de emisión, y detección de radiación ionizante. Finalmente, la obtención, sistematización de resultados y la estructuración del documento, contribuyeron en la formación complementaria como Ingeniero Físico.

#### **1.5 Estructura a desarrollar**

- En el capítulo uno, se mostró la importancia de la protección radiológica, enfocada al campo médico, y el uso de elementos que permitan ejecutar tareas de manera segura y adecuada. Se planteó el problema a estudiar, y se dio a conocer el panorama nacional e internacional, que permitieron poner en contexto la temática tratada.

- En el capítulo dos, se presenta el componente teórico, en el cual se encuentran los conceptos necesarios, para una mejor comprensión de las actividades que se desarrollaron, pasando por la comprensión del fenómeno físico de la radiación ionizante; los mecanismo de detección de radiación; las magnitudes de protección radiológica, que orientan sobre el modo de operación de los equipos con los que se trabajó; además otro componente importante, es la base documental, algunos conceptos importantes en los procesos de verificación, y la normativa que orienta el desarrollo, la implementación y ejecución del programa de aseguramiento metrológico, que finalmente, permite determinar si los detectores, se encuentran en condiciones aceptables para su uso en los diferentes servicios de la institución.
- El capítulo tres, presenta el desarrollo del plan de aseguramiento metrológico, en el cual se ejecuta la metodología más eficiente y que mejor se adapta a las condiciones de la institución, indicando los procesos ejecutados, junto a su montaje experimental, los materiales utilizados como referencia, los diferentes equipos que se emplearon, y la definición de los periodos de verificación.
- En el capítulo cuatro, se analiza los resultados a partir de las verificaciones realizadas a los DRI, según su modo de operación, los resultados, se presentan de manera ilustrativa en gráficas de barras, dispersión y tortas.
- El capítulo cinco, presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado, las cuales responden a los objetivos planteados y a las inquietudes que surgieron durante la ejecución del mismo.
- Al final del documento, se presenta la bibliografía estudiada a lo largo de este trabajo, y en anexos se presenta el consolidado de todos los resultados con el fin de ampliar la información presentada en esta investigación.

# Capítulo **2**

## Marco teórico

En este capítulo, se presenta las pautas iniciales para el desarrollo de este trabajo de investigación, con esto, se pretende entender el problema para tratarlo de la manera más adecuada. Aquí, se definen los conceptos fundamentales para la detección de radiación ionizante, la normativa que mejor se adapta y rige el desarrollo para el aseguramiento metrológico de los DRI, los procesos que se implementaron para asegurar la correcta operación de este tipo de detectores, los cuales, se acondicionaron teniendo en cuenta la coincidencia de conceptos encontrados en referentes nacionales e internacionales que permitieron llevar a cabo este trabajo.

## **2.1 Marco conceptual**

La radiación, es un fenómeno mediante el cual se propaga la energía en forma de ondas electromagnéticas o como partículas subatómicas, ya sea en el vacío o en un medio material. Lo que hoy en día se conoce acerca de los átomos y la radiación ionizante, es el resultado de los experimentos de física atómica [16], [17] llevados a cabo a finales del siglo XIX [18]. A continuación, se describen conceptos importantes que ayudan a comprender mejor el fenómeno de la radiación ionizante y su interacción con el entorno.

### **2.1.1 Radiación ionizante**

Es una forma de energía que hace que los átomos o moléculas adquieran carga eléctrica, incluso es capaz de alterar enlaces moleculares. Existen varios tipos de radiación ionizante (Figura 2.1): i) de naturaleza física corpuscular: como las partículas alfa (núcleos de Helio) con alto poder de ionización, estas son partículas pesadas que solo recorren unos pocos centímetros en el aire; también están las partículas beta (electrones y positrones) con bajo poder de ionización, tienen una menor masa y energía pero son más penetrantes [19]; finalmente en este grupo están los neutrones, al no tener carga eléctrica, penetran con facilidad la estructura y provocan la división de determinados átomos; ii) también existe radiación ionizante en forma de onda electromagnética, como los rayos gamma que se originan en la desintegración radiactiva de los núcleos atómicos, con bajo poder de ionización y alta capacidad de penetración; por otro lado los rayos X, fotones con alta energía, se

producen a nivel extra nuclear cuando un electrón proyectil pasa lo suficientemente cerca del núcleo, produciendo una interacción electrostática, esto hace que el electrón se desvíe y se frene perdiendo energía cinética, la cual es emitida en forma de un fotón, o cuando un electrón proyectil arranca uno de los electrones más internos del átomo, ionizándolo.

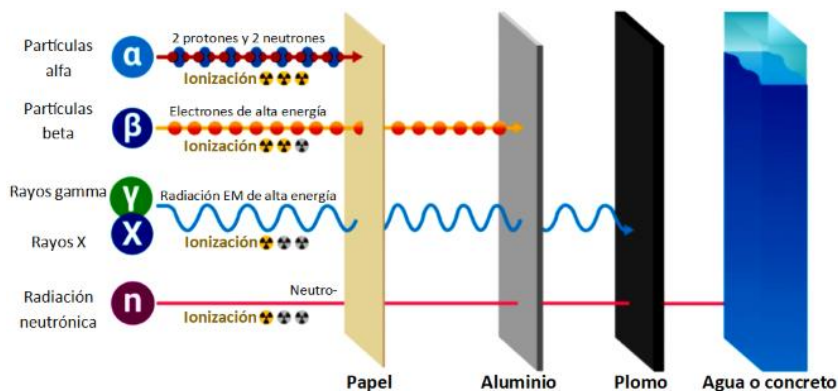


Figura 2.1. Interacción de los diferentes tipos de radiación ionizante con algunos materiales<sup>2</sup>.

La radiación ionizante, producto de la desintegración espontánea de los átomos, se origina de diferentes fuentes, las hay de dos clases, naturales y artificiales, de estas últimas existen diferentes configuraciones, las cuales se distinguen por ciertos parámetros como: el periodo de semidesintegración ( $T_{1/2}$ ) que es el tiempo necesario para que un radionúclido desintegre a la mitad sus átomos radiactivos, el radionúclido se considera como un átomo inestable, a medida que se descompone liberando radiación, se vuelve más estable; otro parámetro a considerar es la energía de radiación, que indica el poder de ionización y es característica física propia de cada material, esta se encuentra en el orden de los keV y los MeV; entre tanto, el parámetro geometría, como: puntual, lineal, con volumen, disco, losa, entre otras (figura 2.2), permite hacer aproximaciones matemáticas para estimar por ejemplo la exposición radiactiva<sup>3</sup>, la cual indica la cantidad de carga eléctrica por unidad de masa de aire [20], generada ante la radiación ionizante; obteniéndose así valores más cercanos a la realidad. Tener en cuenta los diferentes tipos de geometrías y su aplicación, permite la

<sup>2</sup> Fuente: Adaptado de <https://www.ans.org/nuclear/radiation/>

<sup>3</sup> Exposición radiactiva (X) se expresa en  $C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$  o  $R \cdot s^{-1}$  (Röntgen (R), equivalente a  $2,58 \cdot 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$ ), la exposición en un periodo de tiempo definido se conoce como tasa de exposición ( $\dot{X}$ )

estimación correcta de la cantidad de radiación medida, este conocimiento es importante para el personal de física médica en sus labores cotidianas [21].



Figura 2.2 Tipos de fuentes radiactivas a) dedal, b) lineal<sup>4</sup>, c) gotero, d) puntual, e) plana (losa).

### 2.1.2 Detección de radiación ionizante

La radiación ionizante no puede ser percibida por los sentidos, por esto los avances en ciencia y tecnología en esta área, se enfocan en desarrollar instrumentación que permita cualificar y cuantificarla, con la finalidad, de prevenir posibles efectos perjudiciales para la salud por una sobreexposición. Entre los distintos mecanismos para la detección de radiación están: i) Producción de carga: se da cuando la radiación ionizante pasa por un volumen de gas (como Argón o Helio [22]), una parte de sus átomos es ionizada, como consecuencia, se liberan iones positivos y electrones (figura 2.3 b). Inicialmente, el gas se comporta como aislante eléctrico, al ser ionizado por efecto de la radiación, pasa a ser parcialmente conductor. Puede deducirse la intensidad de la radiación que atraviesa el volumen de gas, midiendo la corriente eléctrica que circula por él. ii) Luminiscencia en algunos sólidos: es apreciable al atravesar ciertos sólidos (como yoduro de cesio [23], fluoruro de litio [24]), donde la radiación ionizante, promueve la excitación de una fracción de los átomos del material atravesado, los cuales, emiten fotones luminosos cuando son des-excitados. La medición de la luz emitida, es proporcional a la radiación ionizante con la cual el elemento fue excitado. iii) Disociación de la materia: se da, cuando ocurre el rompimiento de enlaces químicos produciendo alteraciones en la constitución de la materia, en respuesta a la radiación. Esto se puede apreciar en las películas fotográficas usadas para deducir la dosis de radiación al cuantificar la intensidad de la tonalidad oscura que produce este efecto [25].

<sup>4</sup> Fuente: Eckert & Ziegler Reference & Calibration Sources Product Information



### **2.1.3 Detectores de radiación**

Los detectores de radiación ionizante, son ampliamente utilizados en el área de la salud en radioprotección, se clasifican según el mecanismo físico involucrado en el proceso de detección. La respuesta que presentan los detectores, puede variar por diferentes factores, por ejemplo, la energía y el tipo de radiación, la tasa de emisión, la geometría del equipo y las condiciones ambientales en las que se realiza las mediciones. Los tipos de mediciones se centran en la puesta en servicio y el aseguramiento de la calidad, monitoreo personal y ambiental [26]. Los monitores comúnmente utilizados para medición de radiación poseen detectores de ionización gaseosa siendo el más usado el detector Geiger Müller.

### **2.1.4 Detectores gaseosos**

#### **2.1.4.1 Cámara de ionización**

Consiste en un volumen de gas, generalmente aire, donde se encuentran dos electrodos que pueden tener geometría planos paralelos o un arreglo cilíndrico [26], los cuales están alimentados con un voltaje que es lo suficientemente alto para coleccionar los iones producto de la radiación incidente, y lo suficientemente bajo para evitar cualquier producción de pares de iones secundarios, los voltajes suelen ser del orden de unos cientos de voltios, la orientación de los iones creados, produce una corriente que puede medirse con un electrómetro (corrientes entre  $10^{-14}$  y  $10^{-7}$ A) [27]. Estos detectores son vulnerables ante cambios de temperatura, presión y humedad.

#### **2.1.4.2 Contador proporcional**

A diferencia de las cámaras de ionización que funcionan con cualquier gas, incluyendo el aire, un contador proporcional debe contener un gas con baja afinidad electrónica, así, pocos electrones libres se unen a las moléculas de gas. Una cámara de ionización, producirá una corriente de acuerdo al número de electrones recolectados por segundo. Esta corriente se promedia y se usa para indicar una lectura de pantalla en Bq o Sv/h. Los contadores proporcionales no funcionan de esta manera, en cambio, amplifican cada una de las explosiones individuales de ionización, para que cada evento ionizante se detecte por separado[28].

### 2.1.4.3 Geiger-Müller (GM)

Consiste en una cámara con una mezcla de gas a baja temperatura, que contiene dos electrodos, entre los cuales se aplica un voltaje. Las paredes del tubo son de metal, para formar el cátodo, mientras el ánodo es un alambre en el centro. Cuando la radiación ionizante llega al tubo, algunas moléculas del gas son ionizadas, ya sea directamente, por la radiación incidente, o indirectamente, por medio de electrones secundarios producidos en las paredes del tubo, creando pares iónicos. El campo eléctrico creado por los electrodos, es tan fuerte, que acelera los iones positivos hacia el cátodo, y los iones negativos hacia el ánodo. Cerca al ánodo, los electrones adquieren suficiente energía para ionizar otras moléculas de gas, y crear un número grande de avalanchas electrónicas, que se propagan a lo largo del ánodo a través de la región de avalancha. Este efecto multiplicador del gas, es el que le da al tubo GM, su característica capacidad de producir señales significativas a partir de un único evento de ionización [29]. Los pulsos del tubo son siempre de la misma magnitud, sin importar la energía del par iónico iniciador. Por tanto, no hay información de la energía de radiación, lo que significa que el tubo GM no puede ser usado para generar información espectral acerca de la radiación incidente.

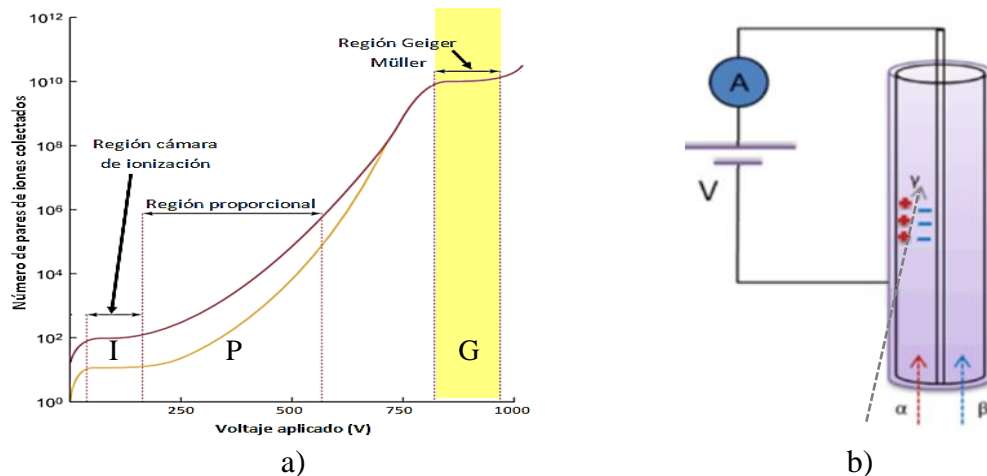


Figura 2.3 a) Regiones de detectores de ionización gaseosos<sup>5</sup>, b) Geiger Müller<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Fuente: Adaptado de The Essential Physics of Medical Imaging, Jerrold T. Bushbers, J. Anthony Seibert, Edwin M. Leidholdt, and John M. Boone, Tercera ed., vol. 180, no. 3. 2013

<sup>6</sup> Fuente: Adaptado de <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/radiation-detection/gaseous-ionization-detector/geiger-counter-geiger-mueller-detector/applications-of-geiger-counters/>

A medida que aumenta el voltaje (región I) se alcanza una meseta en la curva, esta es la región donde operan las cámaras de ionización, el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte para recolectar casi todos los iones y la corriente no es tan significativa. Posterior a esta región, la corriente colectada incrementa con el voltaje aplicado, esta región es conocida como la región proporcional (P), para cualquier voltaje, la cantidad de carga eléctrica colectada de cada interacción, es proporcional a la cantidad de energía depositada en el detector por la interacción. Luego se encuentra la región G (Geiger Müller) donde la cantidad de carga colectada en la misma región y el tamaño del pulso no distingue el tipo de radiación, simplemente cuenta los pulsos (Figura 2.3 a).

### 2.1.5 Cantidades y unidades

- **Actividad radiactiva (A):** Representa el número de núcleos que desaparecen o se desintegran (dN) en un intervalo de tiempo determinado (dt). La unidad en el Sistema Internacional para la radiactividad es el Becquerel (Bq) que se define como una desintegración por segundo (dps) [30], y se representa según la siguiente expresión:

$$A = -dN/dt \quad (2.1)$$

- **Ecuación de la desintegración radiactiva:** La desintegración radiactiva es un proceso aleatorio a nivel de átomos individuales, para un conjunto de átomos la actividad radiactiva esperada ( $A_t$ ) se caracteriza por la actividad radiactiva inicial ( $A_0$ ), la constante de decaimiento ( $\lambda$ ) o por el tiempo de vida media  $T_{1/2}$  ( $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$ ). Este proceso se realiza de forma estadística y se expresa mediante una relación de carácter exponencial:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

- **Contaminación superficial ( $S_A$ ):** Se define como la presencia no deseada de sustancias radiactivas en un área. La actividad de una sustancia radiactiva, se determina por el valor del número de desintegraciones que sufre por unidad de tiempo en un área definida. En el Sistema Internacional la contaminación superficial se expresa en Becquerels por

centímetro cuadrado ( $\text{Bq}/\text{cm}^2$ ), también puede expresarse en cuentas por segundo (cps) o cuentas por minuto (cpm).

- **Dosis absorbida (D):** Cuantifica la cantidad de energía absorbida por una cantidad de masa. Esta magnitud toma en cuenta cualquier tipo de radiación ionizante, a diferencia de la exposición radiactiva (X). Se expresa en  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  o la unidad denominada Gray (Gy) [31].
- **Dosis equivalente (H):** Esta magnitud tiene en cuenta un factor que representa el diferente daño biológico producido por los diferentes tipos de radiación. La dosis en un órgano o un tejido T, está dada por la dosis absorbida  $D_{T,R}$  debida a tipo de radiación R en el tejido T, por el factor de ponderación  $W_R$ . La unidad de la dosis equivalente es  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , y su nombre especial es Sievert (Sv) [32].
- **Dosis efectiva (E)** Relaciona la dosis equivalente (H) con la radiosensibilidad de las células, tejidos y órganos (factor de ponderación  $W_T$ ). Se expresa en  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  o la unidad denominada Sievert (Sv).
- **Dosis equivalente personal ( $H_p(d)$ ):** Relaciona la dosis equivalente con la radiosensibilidad de las células, tejido u órganos, por lo que se introduce así la probabilidad de efectos estocásticos junto a los factores de peso. Corresponde a la dosis equivalente en tejido blando, a cierta profundidad (d [mm]) (0.07, 3.0, 10.0) bajo determinado punto del cuerpo, se expresa en unidades de  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  o Sv (Sievert).
- **Dosis equivalente ambiental ( $H^*(d)$ ):** Representa la dosis equivalente producida por un campo de radiación alineado en una esfera ICRU<sup>7</sup>, a cierta profundidad (d[mm]) (0.07, 3.0, 10.0) en el radio opuesto a la dirección del campo alineado cuya unidad es  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  o Sv [33].

## 2.2 Marco normativo

A continuación, se presenta la normativa relacionada con el aseguramiento metrológico, que es uno de los pilares para el desarrollo de este trabajo, en esta sección se describe en resumen

---

<sup>7</sup> Fuente: <http://diccionario.raing.es/es/lema/esfera-icru>. ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements

los puntos clave que mejor se adaptan a las condiciones de la FVL (instrumentos y fuentes radiactivas).

### **2.2.1 Resolución número 482 de 2018**

El Ministerio de Salud, mediante la normativa nacional sobre licencias de prestación de servicios de protección radiológica y control de calidad, y licencias de práctica médica entre otros, expresa que deben existir certificados de calibración de los equipos y detectores (para el control de calidad de las máquinas) con la periodicidad que establezca el fabricante, en caso de que el certificado no establezca término de vigencia de la calibración, este se entenderá de 2 años [7].

### **2.2.2 Resolución 18-1434 de 2002**

Normativa del ministerio de minas y energía por la cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica. Expresa que es un deber, el detectar deficiencias en las mediciones y recursos que contribuyen a la protección y seguridad, tomando acciones que permitan evitarlas y/o corregirlas. Además, se debe contar con los equipos adecuados para la vigilancia radiológica, los cuales deben cumplir con las frecuencias de calibración o verificación, junto a sus certificados de calibración de laboratorios autorizados y que estos sean correctos [34].

### **2.2.3 NTC-ISO 10012**

La norma técnica colombiana (NTC) establece los requisitos para los procesos de medición, para la confirmación metrológica establece las características esenciales de los registros de medición [35].

### **2.2.4 ISO/IEC/NTC 17025:20054**

Instaura los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, y la información que deben cumplir los certificados por ejemplo: “no debe contener ninguna recomendación sobre el intervalo de calibración, excepto que esto haya sido acordado con el cliente” [36].

## 2.2.5 Aseguramiento metrológico de equipos de laboratorio INS 2015

Esta guía Colombiana del Instituto Nacional de Salud (INS), reúne conceptos aplicados en otros países en base a la guía ILAC<sup>8</sup>-G24 OIML<sup>9</sup> D10, 2007, establece y describe la metodología para la determinación de los intervalos de calibración para instrumentos de medición (Tabla 2.1) [37], [38].

- Método 1: Ajuste automático o en “escalera” (tiempo calendario)
- Método 2: Carta de control (tiempo calendario)
- Método 3: Tiempo en uso
- Método 4: Verificación en servicio o prueba de “caja negra”
- Método 5: Otros enfoques estadísticos

Tabla 2.1 Comparación de métodos para determinar intervalos de calibración<sup>10</sup>

Parámetros de evaluación	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5 <sup>11</sup>
Confianza	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
Esfuerzo de aplicación	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto
Carga de trabajo equilibrada	Medio	Medio	Malo	Medio	Malo
Aplicabilidad con respecto a ítems particulares	Medio	Bajo	Alto	Alto	Bajo
Disponibilidad de instrumentos	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio

Se compara los métodos antes mencionados, utilizando parámetros como: i) la confianza, esta que representa la facilidad de interpretar los resultados del método usado; por su parte ii) el esfuerzo de aplicación, indica la facilidad de implementación del método en general; iii) la carga de trabajo, indica la facilidad de desarrollar el método, realizar los registros y ejecutar las tareas; iii) aplicabilidad con respecto a ítems particulares depende de comportamientos específicos de los equipos y no son fáciles de generalizar; finalmente, iv) la disponibilidad de instrumentos, representa el tiempo que se requiere para el uso del instrumento en la aplicación del método.

<sup>8</sup> ILAC: International Laboratory Accreditation Cooperation

<sup>9</sup> OIML: Organisation Internationale de Métrologie Légale

<sup>10</sup> Fuente: OIML D10, Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments, 2007

<sup>11</sup> Se logra una mejor calificación cuando se utiliza una herramienta de software adecuado

### **2.2.6 Guía N° 14 y Guía N° 30 buenas prácticas de medición**

Describen los procedimientos recomendados para el examen, prueba y calibración de monitores portátiles para tasa de dosis y contaminación superficial, estas recomendaciones, son útiles para cumplir con las normativas que evalúan el monitoreo de los niveles de radiación en los lugares de trabajo. Los aportes de estos documentos provienen del laboratorio nacional de física por sus siglas en inglés *National Physical Laboratory* (NPL) del Reino Unido [12], [13].

### **2.2.7 Serie de informes de seguridad N° 16**

Elaboradas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), son una serie de recomendaciones para la calibración de instrumentos de monitoreo en protección radiológica, establece normas y medidas de seguridad extendidas a la seguridad nuclear, la seguridad radiológica, la seguridad del transporte y la seguridad de los desechos, y también la seguridad en general [4].

### **2.2.8 Metrología**

El aseguramiento metrológico es considerado como herramienta para el control y mejoramiento continuo de la calidad. Establece de manera clara todo lo que se debe medir, el método de medición y qué tan confiables son las mediciones.

La gestión metrológica busca, entre otros aportes, generar:

- Certeza de que los equipos utilizados están funcionando bajo los estándares de calidad establecidos por el fabricante.
- Certeza de que los equipos trabajan en los rangos permitidos para las magnitudes y la confianza en los resultados obtenidos, según especificación del método de ensayo desarrollado.
- Cumplimiento de los requisitos de la normatividad aplicable [39].

Para ello es necesario contar con componentes como: personal, instalaciones y condiciones ambientales, análisis de las necesidades de medición, equipos y procedimientos de calibración o verificación.

### **2.2.8.1 Operaciones de Confirmación Metrológica (OCM)**

Según la norma ISO 10012:2003 las OCM se definen como el conjunto de acciones necesarias, para asegurar que los instrumentos de medición cumplen con los requisitos y especificaciones técnicas para el uso previsto [40].

Son varias las actividades que hacen parte de la confirmación metrológica, entre ellas: mantenimiento, ajuste, calificación, calibración y verificación, de acuerdo a los requisitos metrológicos de los equipos de medición, se tienen consideraciones tales como rango, resolución, errores permitidos, capacidad de medición y calibración [41].

Se debe tener en cuenta los certificados de calibración previos a las pruebas de aseguramiento metrológico, magnitudes a asegurar, puntos de verificación, establecer intervalo de medición, informe de operaciones de confirmación metrológica, cuáles son los parámetros a revisar de los certificados de los patrones de referencia antes del aseguramiento metrológico. Por su parte, la verificación metrológica, se articula a procesos de calibración, decisiones y acciones, juntos permiten validar el buen desempeño de la instrumentación [35], [40].

### **2.2.8.2 Condiciones generales para las OCM**

#### **a) Inventario de equipos**

Desde el punto de vista organizacional, la OFM&PR tiene como prioridad, llevar a cabo los controles de calidad de la instrumentación que permite cuantificar la radiación ionizante, por esta razón, es importante contar con la información detallada de estos equipos, que se almacena en el inventario general de detectores de radiación ionizante, este se actualiza anualmente y lo custodia el encargado de la verificación de los equipos.

Entre los datos más relevantes de estos equipos encontramos:

- Datos generales del equipo: Nombre del equipo, identificación o código interno (SAP), medición que realiza, ubicación.
- Datos suministrados por el fabricante: Modelo, serie y marca o fabricante cuando aplique, fecha de puesta en servicio.
- Especificaciones del equipo: Rango de medida, unidad, si posee manual de operación.
- Requerimientos de calibración: Frecuencia o intervalo, modo de calibración.
- Condiciones tolerables para el uso del equipo: Temperatura, humedad relativa, presión, voltaje de operación, entre otros [42].



## **b) Mantenimiento y Calibración**

Esta actividad la gestiona el personal de equipos biomédicos, quienes son los encargados de realizar el contacto con los proveedores de estos servicios con una frecuencia definida, además se encargan de custodiar los registros y certificados.

Los requisitos fundamentales para el mantenimiento y calibración de los equipos [43] son:

- Equipos a calibrar para los diferentes modos de operación
- El prestador de servicios, debe cumplir con los requisitos generales planteados en la norma ISO 17025-2005 (para calibración de equipos), contar con patrones con certificación vigente para los procesos de calibración, y presentarlos en el momento de cada servicio, demostrar competencias y experiencia en el mantenimiento preventivo y correctivo de equipos y tecnologías empleadas en servicios de salud o afines, y estar certificado bajo normas de gestión como ISO 9001<sup>12</sup> (o similares) y garantizar la idoneidad de su personal.
- Entregar un informe del servicio realizado, con la verificación de funcionamiento del equipo, ante el personal encargado del mismo. En caso de no presentar un informe o ante un eventual error en el proceso, se debe generar una no conformidad ante el prestador de servicios de mantenimiento y calibración.
- En cuanto a los patrones utilizados, debe presentar las resoluciones o certificados de cumplimiento e implementación, además, debe garantizar su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales, la metodología de calibración empleada, incertidumbre asociada a la calibración, fechas de vigencia de calibración realizada (si son solicitadas).
- Si la incertidumbre del equipo no cumple con los requisitos mínimos establecidos, se procederá a realizar procesos de verificación en la institución, para corroborar la información presentada.
- Cuando un equipo esté por fuera de las especificaciones requeridas según las verificaciones realizadas, será puesto fuera de operación, adicionalmente será marcado con el fin de evitar su uso intencionado, hasta que el equipo regrese a su correcto funcionamiento.

---

<sup>12</sup> ISO 9001 - Establece los requisitos para los Sistemas de Gestión de Calidad

- En caso de continuar el equipo con un error considerable, se debe implementar como acción correctiva, el cambio de equipo o tecnología existente, con la finalidad de no afectar la calidad del servicio, para ello la OFM&PR emitirá un concepto de validación del instrumento y será el encargado de equipos biomédicos a partir de esta información, quien culmine este proceso.
- Los equipos deben ser identificados con una marcación visible, donde se muestre el estado actual del mantenimiento o calibración, igualmente se deberá almacenar y tener disponible en físico o en digital los certificados y documentación del proceso.

Nota: No es necesario calibrar y verificar todos los equipos [39].

### **2.2.8.3 Periodicidad de las OCM**

Según la Asociación de Fabricantes de Aparatos Científicos (SAMA por sus siglas en inglés), las especificaciones declaradas por los fabricantes, deben mantenerse en el equipo al menos por un año después de su fabricación. Sin embargo, con el paso del tiempo puede ser necesario y/o conveniente ajustar dichos intervalos, con el fin de optimizar el balance de riesgos y costos [39]; para ello se deben tener en cuenta aspectos como:

- Comportamiento del equipo en el tiempo, resultados de verificaciones intermedias realizadas con patrones de trabajo calibrados o materiales de referencia certificados.
- Disminución o aumento en la frecuencia de uso.
- Comportamiento de la deriva determinada por la re-calibración del equipo, que demuestre que periodos de calibración más largos podrían ser factibles sin incrementar los riesgos [38].

Las frecuencias de prueba deben adaptarse a la confiabilidad del equipo y las condiciones de uso. Sin embargo, las pruebas de equipo, siempre deben realizarse después de la primera instalación o uso, después de regresar de calibración (para obtener valores de referencia para todos los parámetros de prueba), después de las actualizaciones de hardware o software, y después de problemas y reparaciones específicos. Como regla general, se debe comenzar con una frecuencia diaria, semanal y mensual, luego se puede reducir la frecuencia si no se producen desviaciones que excedan el umbral de acción durante pruebas consecutivas, en

caso de una desviación repentina e inesperada, la frecuencia de prueba debe aumentarse nuevamente [1].

## 2.3 Marco procedimental

Esta sección, describe el mecanismo base para realizar las mediciones experimentales de los diferentes modos de operación en los equipos, y la base teórica con la cual se confrontan los resultados. El procedimiento estructurado se encuentra en el Anexo I.

### 2.3.1 Contaminación superficial ( $S_A$ )

Un medidor de este tipo, incluye uno o más detectores de radiación ionizante, la medición se realiza en términos de actividad por unidad de área o tasa de conteo por unidad de tiempo, esta medición se puede calificar por dos métodos: i) evaluación directa, se lleva a cabo con equipos que responden a la contaminación removible y fija; ii) la evaluación indirecta, es generalmente llevada a cabo por medio de pruebas de frotis y solamente la contaminación superficial removible puede ser evaluada [6], [14].

Generalmente para mediciones de  $S_A$ , la fuente de referencia y el detector se deben ubicar a una distancia de 1,0 cm, esto debido a que las partículas emitidas por la radiación a identificar tienen corto alcance [4], [12], [13], [44] (figura 2.4), usualmente estas distancias se tienen en cuenta en la calibración para contaminación superficial [5].

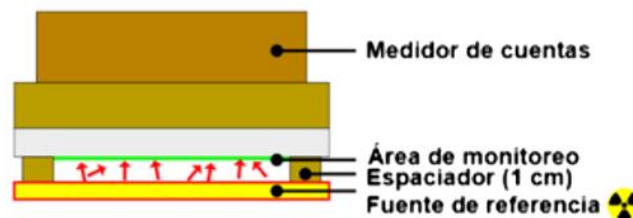


Figura 2.4 Esquema para detección de contaminación superficial<sup>13</sup>

#### 2.3.1.1 Método de posiciones contiguas

Permite evaluar que la respuesta a la radiación, sea razonablemente uniforme en toda el área efectiva del detector. Al ubicar la fuente en posiciones sucesivas, se puede simular una fuente

<sup>13</sup> Fuente: <https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/training/workplacemonitoring/Shared%20Documents/5%20Surface%20Contamination%20Measurement.pdf>

de cualquier dimensión, es importante cubrir la totalidad del área efectiva de medición por lo que se usará el número de posiciones que se considere necesario, de tal manera que no estén sobrepuestas las posiciones de la fuente (figura 2.5). Esta delimitación de las posiciones minimiza los errores al posicionar la fuente, y por tanto cualquier contribución a la incertidumbre general de la medición [12], [45]. La lectura registrada por cada zona es un promedio de las medidas realizadas, la suma de estos promedios permite obtener la lectura total del detector.

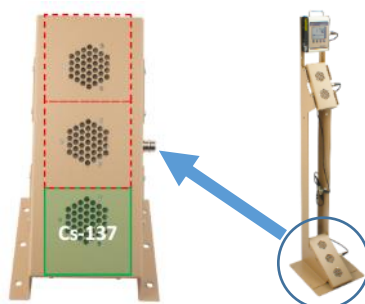


Figura 2.5 a) Grilla para posiciones contiguas, b) detector de radiación de manos y pies<sup>14</sup>

El valor nominal de contaminación superficial ( $CR_{Ref}$ ), se obtiene a partir de los valores de la fuente de referencia que se encuentran en su certificado de calibración, se tiene en cuenta correcciones por decaimiento radiactivo, considerando los valores característicos del radionúclido, como: fecha de referencia, tasa de emisión superficial inicial que se encuentra en desintegraciones por segundo (dps), área de la fuente y fecha en que se realiza la medición. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$CR_{Ref} = \frac{\text{Tasa de emisión superficial}}{\text{Área de la fuente}} = \frac{\text{dps}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2} \quad (2.3)$$

Para el valor de contaminación superficial experimental ( $CR_{Exp}$ ) se debe calcular el factor de contaminación  $\beta$  ( $F_{Cont}(\beta)$ ) teniendo en cuenta:

- Área del detector ( $A_d$ ).
- Eficiencia del equipo ( $E_i$ ) para la energía beta máxima ( $\beta_{max}$ ) del radionúclido.
- Probabilidad de emisión  $\beta$  para el radionúclido ( $E_d$ ).
- Eficiencia de la fuente de contaminación ( $E_s$ ).

<sup>14</sup> Fuente: Adaptado de <https://ludlums.com/products/all-products/product/model-3276hfm>

$$F_{\text{Cont}}(\beta) = \frac{1}{A_d * E_i * E_d * E_s} \quad (2.4)$$

$$CR_{\text{Exp}} = \text{Lectura del equipo} * F_{\text{Cont}}(\beta) = \text{cps} * \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2 * \text{cps}} = \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2} [5], [46] \quad (2.5)$$

### 2.3.2 Tasa de exposición radiactiva ( $\dot{X}$ )

En el esquema para la medición de exposición radiactiva, la fuente de referencia y el detector se deben ubicar a una distancia “a” de 10 cm, distancia desde el centro de la fuente al centro del detector [47], distancia sugerida en varias guías y documentos de referencia [1], [10], [11], donde los detectores muestran una respuesta aceptable (figura 2.6).

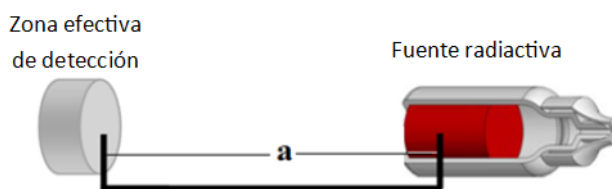


Figura 2.6 Esquema para exposición radiactiva<sup>15</sup>

El valor nominal de exposición radiactiva considerando el caso ideal para una fuente puntual, se aplica cuando la dosis es calculada a una distancia, que sea al menos diez veces la dimensión más grande de la fuente [48], esto se expresa como:

$$\dot{X}(a) = \frac{A G}{a^2} \quad [49] \quad (2.6)$$

Donde  $\dot{X}(a)$  es la tasa de exposición sin atenuar, se suele expresar en mSv/h (miliSievert/hora), A es la actividad de la fuente dada en Bequerelios (Bq), G Constante gamma<sup>16</sup> (mSv.m<sup>2</sup>/h.MBq), "a" es la distancia desde la fuente puntual a la zona efectiva de detección (0,1 m). Para llevar esta expresión a una situación real, se tienen en cuenta otras geometrías (dedal, disco, losa, etc.), por ejemplo, las fuentes con volumen (figura 2.2), donde a partir de la expresión inicial, se introduce otros parámetros como el radio (R), la distancia

<sup>15</sup> Fuente: Adaptado de Eckert & Ziegler Reference & Calibration Sources

<sup>16</sup> G indica la tasa de exposición generada por una fuente puntual ubicada a 1 m de distancia, por unidad de actividad

(a) en el punto P respecto a la fuente, el grosor de la fuente (d), y su concentración de actividad ( $C_v$ ). La tasa de exposición  $\dot{X}$  (a) está dada por:

$$\dot{X}(a) = \frac{\pi G C_v}{\mu} (1 - e^{-\mu d}) \ln \left( \frac{R^2 + a^2}{a^2} \right) \quad [50] \quad (2.7)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente lineal de absorción<sup>17</sup>.

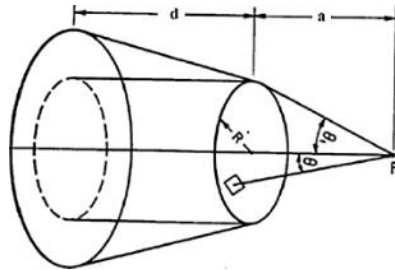


Figura 2.7 Parámetros a considerar en una fuente cilíndrica<sup>18</sup>

### 2.3.3 Incertidumbre de la medición

Se obtiene a partir de la ecuación 2.8, donde  $x_i$  representa el valor medido y  $\bar{x}$  es la media de los datos, esta expresión muestra la varianza de cada medición respecto al valor promedio, a partir de lo anterior se obtiene la incertidumbre tipo A ( $u_A$ ) (ecuación 2.10)

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.8)$$

$$s(x_i) = \sqrt{s^2} \quad (2.9)$$

$$u_A = \frac{s^2(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2.10)$$

La incertidumbre expandida combinada (U) es estimada multiplicando la incertidumbre anterior por un factor de cobertura de valor 2, lo cual representa un intervalo de confianza en las mediciones del 95,45% [51], [52], [53], y se expresa como:

$$U = 2 u_A \quad (2.11)$$

De acuerdo a la documentación de base para este tipo de detectores, se adopta el rango para la variación típica en las mediciones para propósitos de radioprotección, este rango es  $\pm 30\%$

<sup>17</sup>  $\mu$  indica la reducción de la intensidad del campo de radiación por  $\text{cm}^2$  del medio absorbente

<sup>18</sup> Fuente: Adaptado de Stabin, M. G., Radiation protection and dosimetry. Springer, 2007

[4], [54], [55], el cual permite evaluar de manera oportuna el buen desempeño de los detectores.

## 2.4 Marco referencial

En este apartado, se resume las características más importantes de los trabajos encontrados que se realizaron en el campo de la detección de radiación ionizante, las cuales orientan y dan forma al programa de aseguramiento metrológico para este tipo de instrumentación.

- **Pibida, L., R. Minniti, M. O'Brien, and M. Unterweger, Test of radiation detectors used in homeland security applications, Health Phys., vol. 88, no. 5 SUPPL., 2005.**

Esta investigación fue realizada para determinar el aseguramiento de las lecturas de los instrumentos cuando son expuestos ante radiación  $\gamma$ , de un amplio rango de energías y tasas de Kerma en aire (*Kinetic Energy Release in Matter*). Los detectores empleados, se agruparon teniendo en cuenta sus características similares, y se evaluó los resultados en magnitudes de Kerma en aire para todo el grupo. Los datasheet de los instrumentos, en su mayoría muestran que los detectores han sido calibrados y verificados con una fuente patrón de Cs 137, para este caso las fuentes de radiación utilizadas fueron: Co 60 con energía de 1.25 MeV, Cs 137 con energía de 661 keV y tres haces de rayos X altamente filtrados, con energías del haz de 46 keV, 80 keV y 120 keV. Las diferentes tasas de kerma en aire se logran variando la distancia entre la fuente y el detector, siendo 0,74 mR/h el valor para una tasa baja, la tasa media fue 17,9 mR/h, y la tasa más alta fue 525 mR/h. Las mediciones muestran que el comportamiento del grupo de detectores en su mayoría se encuentra dentro del  $\pm 30\%$  de su respuesta esperada. Se identificó que la respuesta de algunos detectores presenta una fuerte dependencia energética, además, la respuesta entre las lecturas de los detectores presentó una discrepancia para bajas energías [56].

- **Minniti, R. and S. M. Seltzer, Calibration of a 137 Cs g-ray beam irradiator using large size chambers, Appl. Radiat. Isot., vol. 65, pp. 401–406, 2007.** En este trabajo se utilizaron cámaras de ionización de gran volumen para determinar las tasas de kerma en el aire en el rango de calibración comprendido entre 1.8 mGy/h (0.2 mR/h) y 5.3 mGy/h (0.6 R/h), se utilizó tres fuentes de Cs 137 con actividades nominales iniciales

de 15 mCi, 300 mCi y 6 Ci para distancias que van desde 1 a 4 m desde la fuente al detector, los resultados muestran una correspondencia dentro del 0,3% entre las lecturas para los diferentes tipos de cámaras, donde la incertidumbre es menor con el incremento en la tasa de Kerma en aire [57].

- **Stanković, K. D., M. L. Vujisić, and L. D. Delić, Influence of tube volume on measurement uncertainty of GM counters, Nucl. Technol. Radiat. Prot., vol. 25, no. 1, pp. 46–50, 2010.** El objetivo de este documento es determinar la dependencia de la incertidumbre de la medición, de un contador GM en el volumen del tubo GM. Datos bibliográficos muestran que hay influencia entre la energía de radiación captada, la orientación de los tubos GM y las características del sistema de lectura, los cuales se consideran como las principales fuentes de incertidumbre. Los resultados teóricos comparados con los resultados experimentales, realizados en condiciones controladas de laboratorio, evidencian la diferencia en la desviación estándar, que puede ser consecuencia de la energía y el ángulo de incidencia de la radiación con la que el detector interactúa, este resultado no es confirmado, más bien se invita a realizar más investigación [58].
- **Tulio, A., H. Rivero, P. O. Verdecia, R. Agustín, S. Águila, and Y. Moreno, Aseguramiento metrológico en la producción y uso de radiofármacos and application of radiopharmaceutical, pp. 20–24, 2012.** Este estudio del Departamento de Metrología de Radionúclidos del Centro de Isótopos en Cuba, muestra la importancia del aseguramiento metrológico de los equipos utilizados en su operación con radionúclidos  $\gamma$  y  $\beta$ , para establecer patrones de medición de Actividad radiactiva, esto les ha generado un reconocimiento en las capacidades de medición y calibración. Además de la calibración de los equipos utilizados en los hospitales, donde se debe garantizar la exactitud en las mediciones realizadas con una periodicidad definida, se debe asegurar que durante los periodos entre calibraciones, el equipo responde de manera adecuada. En este estudio exponen cómo brindar unas mediciones adecuadas, va de la mano con la justificación y optimización que son fundamentos en la protección radiológica, garantizando el aseguramiento de la calidad en el ámbito clínico. En la práctica, se muestran los métodos de calibración y criterios de aceptación, en los ejercicios de aptitud



y comparaciones inter-laboratorios en el período 2006 - 2011, además el programa de comparaciones entre laboratorios hospitalarios, muestran una mejoría de modo que 11 de los 12 resultados reportados muestran un desempeño satisfactorio encontrándose con una incertidumbre inferior al  $\pm 10\%$  [8].

- **Régio Brambilla, C. and G. Hoff, Impact evaluation of the geometry on measurements of solid radioactive waste exposure rates in nuclear medicine, vol. 30, no. 4, pp. 330–340, 2014.** Esta evaluación, se realizó para conocer la tasa de exposición para un detector de radiación ionizante gaseoso tipo Geiger Müller ante fuentes radiactivas de Cs 137, Ba 133 y Co 57. El valor estimado de exposición, considerando una fuente puntual en lugar de una fuente con geometría de volumen, presenta una diferencia entre el 20% y el 70%. El uso de una geometría real, demostró tener un impacto significativo en los datos de la tasa de exposición; la estimación de tasa de exposición obtenida para una fuente con geometría, fue al menos 16% superior a la estimación de una puntual [10].
- **Nucleares, I. A. N. and N. De Cancerología, Routine constancy tests of Geiger-Müller detectors in nuclear medicine and radiopharmacy–Instituto Nacional de Cancerología: A quality assurance proposal for radiation protection equipment, 2020.** Este estudio evalúa el funcionamiento de los equipos GM fijos y portátiles, se usaron fuentes certificadas de Cs-137 tipo gotero para mediciones de exposición radiactiva y fuentes planas de C-14, Cl-36 y Sr-90/Y-90 para mediciones de contaminación superficial. Los resultados presentados se encuentran dentro de la tolerancia del  $\pm 20\%$  [59].
- **Bevelacqua, J. J., Apéndice II: Geometrías básicas de origen y relaciones de atenuación, in Contemporary Health Physics, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, pp. 565–571.** Este escrito, muestra el desarrollo para la estimación de exposición radiactiva considerando diferentes tipos de geometrías que existen para las fuentes radiactivas, se consideran las geometrías básicas y relaciones de atenuación, para el caso particular de una fuente con volumen, se tiene en cuenta las variables más representativas que permiten obtener valores de referencia confiables [60].

- **Kodama, Y., F. F. Suzuki, M. P. Sanches, and D. L. Rodrigues., Discussion on Surface Contamination Monitoring Using Portable Zinc Sulfide, Inst. Pesqui. Energéticas e Nucl. - IPEN-CNEN/SP.** En este trabajo se discute la influencia de los factores que afectan el monitoreo de la actividad superficial radiactiva, por ejemplo: humedad, polvo, tipo de superficie, distancia fuente a detector, geometría de la fuente y eficiencia; se presta especial atención para la detección de partículas alfas. La determinación de la concentración mínima detectable de contaminación superficial es un criterio importante para seleccionar un instrumento apropiado y los procesos de medición, este estudio se desarrolla para detectores de centelleo (ZnS). La contaminación superficial radiactiva se estima teniendo en cuenta la eficiencia del instrumento, la cual es determinada en su calibración y esta es realizada ante fuentes radiactivas que representan una situación real. El considerar los factores inicialmente mencionados y el método de medición, hace que los resultados de contaminación superficial sean más precisos [46].
- **Soriano, B., V. Aranda, and N. Gutiérrez, Determinación de intervalos de calibración, 2004.** Este trabajo, presenta los métodos utilizados para determinar los intervalos de calibración, donde se describen ejemplos, los cuales consideran los factores más importantes para ejecutar esta actividad, además se indica las normativas que aplican en este campo, con la finalidad de asegurar el buen desempeño de los equipos que necesitan calibración, este trabajo presenta a las verificaciones intermedias como uno de los factores que influyen en el ajuste de los intervalos de calibración [61].

#### **2.4.1 Análisis de la literatura**

Las medidas que se toman para evaluar la instrumentación, se basan en procedimientos que se adaptan a las condiciones de la FVL, por ejemplo, la metodología para la calibración de este tipo de instrumentos [4], y las guías para el aseguramiento de la medición de radiación ionizante [12], [13], al igual que procedimientos independientes para mediciones de contaminación superficial [62], y exposición radiactiva [54], [63]. Algunos referentes indican configuraciones para el montaje experimental [10], [64], otros muestran consideraciones especiales para llevar a cabo la medición, por ejemplo, la dependencia direccional entre la fuente y el detector [58], un valor agregado que se le da a esta investigación se encuentra en la consideración de los valores de referencia para condiciones reales [10], [60]. De esta

información se conoce las condiciones óptimas de operación de los equipos, los valores permitidos que sirven para evaluar los detectores y cómo se ejecutan las mediciones. Finalmente, todos los procesos consultados convergen en el mecanismo para el aseguramiento metrológico, de gran importancia para la instrumentación en la radioprotección [8], que permite mejorar los procesos y estén acorde a los requerimientos legales. Adicionalmente, se estudió los métodos que permiten extender un intervalo de calibración de manera confiable [37], [40], [61]. Este trabajo de investigación, sirve de referente para fortalecer los procesos de confirmación metrológica para distintos detectores de radiación ionizante, particularmente los utilizados en el ámbito médico en Colombia, ya que en la actualidad estos procesos son escasos. Para la elección de los artículos más relevantes, se evaluó tres componentes: i) la parte metrológica, donde se indagó por el modo de operación de la instrumentación buscando que sea acorde a la desarrollada en los equipos utilizados en este trabajo; ii) el tipo de detector de radiación ionizante, el cual se perfiló a partir de la clasificación inicial, donde se eligió los DRI gaseosos tipo GM; y iii) el tipo de radiación de prueba, que sea acorde a la que se dispone en la FVL, de esta manera se tiene una perspectiva internacional y nacional (tabla 2.2)

Tabla 2.2 Estado del arte

Atributos / Lugar		Pibida J., et al., 2005	Régio C., et al., 2014	Barbosa N., et al., 2020
Metrología	Exposición radiactiva	✓	✓	✓
	Contaminación Superficial	✓	✗	✓
Detectores	Tipo	GM Detector de centelleo	GM	GM
	Rango de tolerancia	±30%	±25%	±20%
Radiación	Fuente	Cs 137, Co 60, generador de RX	Cs 137, Ba 133, Co 57	Cs 137, Cl 36, C 14, Y 90-Sr 90
	Geometría	Puntual	Puntual y con volumen	Puntual

# Capítulo 3

## Metodología y materiales

Este capítulo presenta los equipos utilizados durante el proceso de verificación, y describe el procedimiento empleado, para realizar las validaciones de operación de los detectores en estudio, es indispensable asegurar que los equipos, se comportan adecuadamente en el periodo comprendido entre calibración y calibración, y no solamente se evalúe el comportamiento en cada calibración [8], para ello se emplean mecanismos que siguen recomendaciones nacionales e internacionales y se adaptan a las condiciones de la FVL.

### 3.1 Clasificación de equipos

A partir del inventario para zonas de trabajo con radiación ionizante utilizados en la FVL, se realizó la primera clasificación partiendo de 112 instrumentos. De acuerdo a las condiciones de interés, se clasificó de la siguiente manera: “No usado” que corresponde a equipos dados de baja o que no operan en ningún servicio; “no requieren calibración” corresponde a equipos que requieren de controles de calidad internos; “requieren calibración” dentro de este último grupo están los detectores de estado sólido, algunas cámaras de ionización, electrómetros y los detectores de radiación ionizante gaseosos (tabla 3.1).

Tabla 3.1 Clasificación inicial

<b>Condición inicial</b>
No usado
No requiere calibración
Requieren calibración

En base a los resultados de la clasificación inicial se realizó una sub-clasificación del grupo de detectores más representativos, en este caso los equipos que “requieren calibración”. Este sub-grupo se dividió en “DRI gaseosos tipo GM”, donde están los equipos en los cuales se implementó la metodología desarrollada en este trabajo para la verificación metrológica; un segundo grupo que correspondió a “Otros equipos a verificar”, que corresponde a cámaras de ionización, electrómetros y detectores de estado sólido, son equipos que se pueden verificar a futuro adaptando la metodología estudiada; y el último grupo “Otros detectores” en el cual se establecieron los detectores que requieren de metodologías distintas a la usada para ser verificarlos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Clasificación de los detectores a calibrar

<b>Detectores que se calibran</b>
DRI gaseosos tipo GM
Otros equipos a verificar
Otros detectores

A continuación, se organizó los DRI gaseosos tipo GM de acuerdo a su condición de uso, en detectores fijos y portátiles. Los detectores fijos son equipos que operan con mayor frecuencia para monitoreo constante, y, por ende, tienen un sitio de operación determinado, además por lo general son equipos robustos que necesitan alimentación directa de la red eléctrica. Por su parte los detectores portátiles son equipos que se utilizan para hacer medidas rápidas de radiación, por ejemplo, ante un derrame radiactivo, ante la manipulación de material radiactivo o para los controles de calidad, los cuales requieren mediciones rápidas, confiables y con facilidad de adquisición, también se caracterizan por ser ligeros y estar alimentados por baterías. La clasificación de los detectores de acuerdo a características y especificaciones técnicas similares se denomina familias de detectores (tabla 3.3), esta clasificación se realizó siguiendo los lineamientos del Instituto Nacional de Salud (INS) [65] y documentos de referencia adaptados para los detectores de radiación ionizante [56].

Tabla 3.3 Clasificación por condición de uso y familias de detectores

	<b>Detectores fijos</b>	<b>Detectores portátiles</b>
<b>Familias</b>	Sonda GM	Detector GM
	Monitor de área	Dosímetro de lectura directa
	Monitor de manos y pies	Cámara de ionización

Esta estrategia permitió establecer claramente las magnitudes a medir, y sobre esta base se evaluó las actividades para definir las Operaciones de Confirmación Metrológica (OCM) aplicables [38]. Luego se asignó las características más relevantes a los equipos, como: denominación equipo, marca, modelo, denominación ubicación, modos de calibración y rango de operación (Anexo A).

### 3.2 Descripción de los equipos y materiales

Los detectores tipo gaseosos GM se distribuyen en diferentes áreas o servicios de la FVL, como: “Radioterapia”, “Braquiterapia”, “PET/CT<sup>19</sup>”, “Medicina nuclear” y radiofarmacia. La distribución de los equipos en las diferentes áreas, depende de su uso y el tipo de radiación empleada. Su uso es esencial para verificar las medidas de seguridad y efectuar la protección radiológica.

#### 3.2.1 Sonda GM

Detector fijo para determinar generalmente altas tasas de exposición local [uSv/h] ante radiación  $\gamma$ , opera para energías entre 0,04–1.3 MeV. Comúnmente utilizados para el monitoreo de habitaciones y lugares de trabajo, por ejemplo, en la producción o fraccionamiento de isótopos radiactivos, monitoreo de pacientes en medicina nuclear y lugares donde se disponen desechos radiactivos (Figura 3.1) [66].



Figura 3.1. Sonda GM marca Graetz, modelo 18550C

#### 3.2.2 Monitor de radiación de área:

Detector fijo que posee indicadores de advertencias (Figura 3.2), alarma ante bajos niveles de radiación (amarillo) y alarma ante altos valores de radiación (rojo), comúnmente utilizados como monitor ambiental en medicina nuclear, modo de operación en tasa de exposición (mR/h) ante radiación  $\gamma$  en los rangos de energía de 0,05 a 1,3 MeV [67].

---

<sup>19</sup> PET/CT: Tomografía por emisión de positrones/tomografía computarizada



Figura 3.2. Monitor de Radiación de área marca Primalert Fluke, modelo 05-443

### 3.2.3 Monitor de radiación de manos y pies:

Equipo fijo utilizado en medicina nuclear (terapias metabólicas) y radiofarmacia, modo de operación en contaminación superficial (cps, cpm o Bq/cm<sup>2</sup>) para radiación  $\beta$  en los rangos de energía de 0,05 a 1,3 MeV [68], algunos modelos cuentan con detectores independientes tipo pancake para manos y pies (Figura 3.3).



Figura 3.3. Monitor de radiación de manos y pies marca Ludlum, modelo 177.

### 3.2.4 Detector GM portátil:

Equipo portátil que cuenta con dos modos de operación, tasa de exposición [uSv/h, mR/h] y contaminación superficial (cps, cpm o Bq/cm<sup>2</sup>), para radiación  $\alpha > 3.5$  MeV,  $\beta > 35$  keV,  $\gamma > 60$  keV [69], usado en medicina nuclear, radiofarmacia, radioterapia (figura 3.4).



Figura 3.4. Monitor portátil de radiación tipo GM marca Fluke, modelo 993.



### 3.2.5 Dosímetro de lectura directa:

Equipo portátil que permite la detección de radiación personal (figura 3.5), realizando mediciones de radiación  $\gamma$  con energías de 0.06 a 2.00 MeV [70], modo de operación en tasa de exposición personal [uSv/h], además muestra dosis acumulada (Sv). Utilizado en radioterapia y radiofarmacia.



Figura 3.5. Dosímetro de lectura directa marca Ludlum, modelo 25-IS-1

### 3.2.6 Fuentes radiactivas

La FVL cuenta con una variedad de radionúclidos en diferentes configuraciones geométricas (figura 2.2), que se utilizan para realizar controles de calidad, de estos recursos se utilizó la fuente tipo plana para mediciones de contaminación superficial y la fuente de geometría con volumen (gotero) para mediciones de exposición ambiental y exposición personal (figura 2.2 e y c). Estas fuentes se eligen por ser radionúclidos de larga vida media para los chequeos de estabilidad [71], lo que permite que las mediciones sean reproducibles. El radioisótopo elegido fue Cesio 137, el cual está dentro del rango de energía de los radionúclidos de uso común en los diferentes servicios y es recomendado para verificaciones por diferentes documentos guía [1], [23], [56], [72], manuales de operación de varios equipos, y documentos en los que se realizan pruebas para este tipo de detectores [10], [55], [59], [62], [73], por su parte la precisión en la medición, particularmente para exposición radiactiva en calibración, es buena para la energía de 662 keV [47], ya que la dependencia energética típica para estos detectores se mantiene cercana a uno (1) que relaciona el valor de referencia con el valor registrado por el detector, para otras energías el comportamiento es un tanto diferente. Estas fuentes deben ser autorizadas para su uso y deben contar con su respectivo certificado el cual contiene las características más importantes, a continuación, se presentan las características para las fuentes tipo gotero y planta.

Tabla 3.4 Características de las fuentes patrón para verificación metrológica [74]

<b>Geometría</b>	<b>Gotero</b>	<b>Plana 100 cm<sup>2</sup></b>
<b>Radionúclido</b>	Cs-137	Cs-137
<b>Actividad (MBq)</b>	7,911	0,001
<b>Emisión superficial (<math>\beta</math>)</b>	-	651s <sup>-1</sup>
<b>Emisión</b>	Gamma ( $\gamma$ ), Beta ( $\beta$ )	Gamma ( $\gamma$ ), Beta ( $\beta$ )
<b>Energía (keV)</b>	$\gamma$ 661,66 $\beta$ 513,97	$\gamma$ 661,66 $\beta$ 513,97
<b>Tiempo (años)</b>	30,17	30,17
<b>Fecha Ref.</b>	1/11/2015	15/11/2011
<b>Marca</b>	Eckert & Ziegler	Eckert & Ziegler
<b>Serial</b>	1826-32-4	147935 – TZ 970

El flujo superficial de la fuente plana se encuentra dentro del  $\pm 10\%$  [4], [75].

Para la actividad radiactiva de la fuente con que se trabajó durante mediciones de exposición ambiental y/o personal y ante exposiciones prolongadas, se utilizó los respectivos Elementos de Protección Personal Plomados (EPPP), como guantes y pinzas para garantizar la protección radiológica del Trabajador Ocupacionalmente Expuesto (TOE) [76], para contaminación radiactiva, la fuente plana se puede considerar como exenta [77], [78] ya que no representa un potencial riesgo por su baja actividad radiactiva.

### 3.3 Montaje experimental

Las mediciones se realizaron en la zona controlada de las instalaciones de radiofarmacia, braquiterapia y medicina nuclear de la FVL, en condiciones ambientales que se encuentran dentro de los rangos permitidos para la correcta operación de los equipos, estos lugares cuentan con las características necesarias para manipular material radiactivo, también, se dispuso de un montaje adecuado para que la medida no se vea afectada por efectos de retrodispersión causados por superficies metálicas o su cercanía a muros y paredes, y alteraciones por equipos electrónicos [79], los materiales utilizados se eligieron por tener un bajo coeficiente de retrodispersión por ejemplo plástico o aluminio [4]. La distancia desde la ventana de detección a la fuente de radiación depende del tipo de radiación.

Estas pruebas permiten, no solo validar el correcto funcionamiento del equipo, para la identificación de las magnitudes de uso común en los diferentes servicios donde se lleva a cabo la protección radiológica, además, permiten evaluar los potenciales riesgos de exposición ante fuentes radiactivas abiertas o equipos generadores de radiación ionizante, y la detección de elementos potencialmente contaminados.

Se realizó validaciones de operación para cada equipo con el fin de determinar las condiciones óptimas para las mediciones, siguiendo las sugerencias de las guías y normas estudiadas [4], [9], [12], [13]. A continuación, se describe el proceso de verificación de los equipos, en donde se midieron distintas magnitudes como: contaminación superficial, tasa de exposición ambiental y tasa de exposición personal.

### 3.3.1 Contaminación superficial

Para la medición de la contaminación superficial se utilizó el método de medición directa [13] (figura 3.6), se utilizó una fuente de geometría plana de Cs 137 teniendo en cuenta sus características (tabla 3.3), esta se ubica a una distancia de 1,0 cm, desde la zona efectiva de medición a la fuente radiactiva, siguiendo las sugerencias de los documentos estudiados [4], [12], [13], [44].

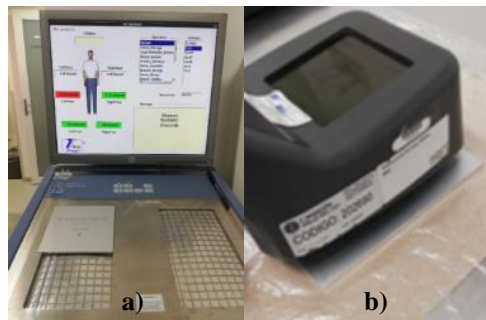


Figura 3.6 Medición de la contaminación superficial a) detector de radiación de manos y pies, marca Tema Sinergie, b) detector portátil Fluke 993 tipo GM

Se registraron lecturas de radiación de fondo para sustraerlo de las siguientes mediciones. Los detectores de contaminación superficial, incluyen uno o más detectores de radiación, existen presentaciones con un área grande de detección, de modo que, fue necesario evaluar la totalidad del área efectiva de medición, aplicando el método de posiciones contiguas.

Se realizaron 5 registros de radiación por contaminación y se obtuvo un valor promedio de medición para cada detector, por ejemplo, aplicando este método para el detector radiación de pies marca Ludlum Modelo 44-26 que posee 3 detectores (figura 2.5), se obtienen 5 mediciones para cada detector, las cuales son promediadas, al final las 3 medidas promedio, se suman para obtener el resultado final del detector, estas se registraron en el formato correspondiente para cada equipo de detección (Anexo H)

### 3.3.2 Exposición ambiental y exposición personal

Se diseñó un montaje, de tal manera que se fijó la posición entre la fuente radiactiva (tipo gotero de Cesio 137) y el detector, a 10 cm [1], [10], [11]. Para su diseño, se tuvo en cuenta la ubicación en posición horizontal [48] en uno de los extremos para la fuente radiactiva, además, el diseño garantizó que se mantuviera la misma distancia entre el detector y la fuente, y que su ubicación sea segura. También se consideró una pieza rotativa cerca al detector, la cual permitió tomar mediciones en distintos ángulos de exposición. Una vez validado el diseño anterior (figura 2.7 a), se envió para su de fabricación, este proceso se realizó en dos etapas, i) la simulación en 3D del diseño (figura 3.7 b), el cual se elaboró en un software CAD (*Computer Aided Desing*); ii) la impresión 3D del montaje final (figura 3.7 c).

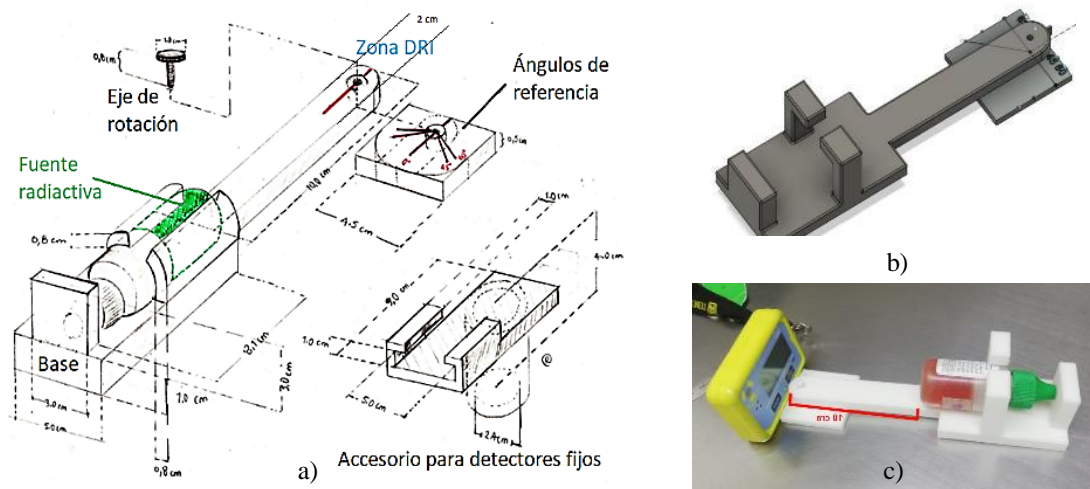


Figura 3.7. Proceso para la construcción del montaje experimental para exposición radiactiva a) boceto inicial, b) modelado en software CAD, c) impresión 3D.

El montaje final consta de 6 piezas (figura 3.8 a), con el cual se puede realizar mediciones para detectores fijos que se encuentren en posición horizontal o vertical (figura 3.8 b y c),

este montaje es modular y puede adaptarse fácilmente a estas posiciones, además, se utilizó en la prueba de geometría el cual permitió angular con facilidad la fuente radiactiva ante el detector.



Figura 3.8. Montaje modular para medición de exposición radiactiva a) Accesorio para detectores fijos, b) mediciones en posición horizontal, c) mediciones en posición vertical

Las mediciones se registraron teniendo en cuenta la radiación de fondo que indica el detector (medición sin las fuentes patrón), para posteriormente sustraerlo de las siguientes mediciones. Algunos equipos permiten restar automáticamente el fondo radiactivo, ajustándose a cero apropiadamente. Luego, se tomaron cinco (5) mediciones de radiación con la muestra fija, en intervalos de cinco (5) segundos.

Las mediciones de radiación para exposición ambiental y personal se registraron en el formato correspondiente (Anexo H).

### 3.3.3 Registro de mediciones

Para facilitar los registros en las pruebas realizadas se enlazó las formas de cada equipo con un código QR (*Quick Response* o código de respuesta rápida), el cual se ubica en un lugar visible del equipo (figura 3.9).



Figura 3.9 Etiqueta de marcación para verificación metrológica

Este enlace permitió acceder de manera fácil y rápida, a los datos del equipo, y evaluar el estado actual, para su uso en los diferentes servicios (figura 3.10), además la herramienta muestra la trazabilidad de las mediciones realizadas y permite actualizar de manera oportuna los datos consolidados, ya que todo se encuentra almacenado en la nube de OneDrive<sup>20</sup> con acceso a cualquier usuario de FVL para su visualización. El anterior proceso se realizó pensando en innovar en la forma como se realiza habitualmente muchos registros aplicando metodologías actuales.

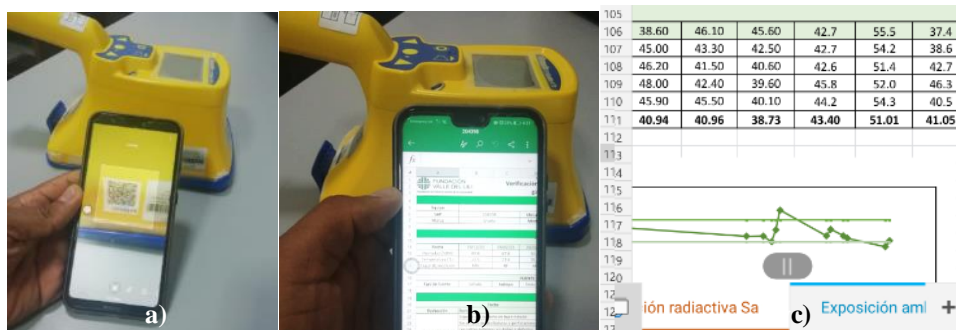


Figura 3.10 Acceso al formato de cada equipo a) lectura código QR, b) formato para dispositivo móvil, c) registro pruebas online.

### 3.3.3.1 Generación código QR

Los códigos QR se generaron utilizando la herramienta de Google Charts<sup>21</sup>, empleando la sintaxis de ejecución que permite especificar el código QR, ajustar el tamaño de la imagen, los datos a codificar, la salida de codificación y corrección de errores para recuperar datos perdidos, mal leídos u oscurecidos [80]. La sintaxis utilizada para la generación de los códigos se muestra en el Anexo F.

## 3.4 Pruebas de verificación

De acuerdo a lo expresado en el componente teórico, se realizan las verificaciones atendiendo las recomendaciones de la Resolución 18-1434 de 2002, con lo cual se pretendió garantizar la confiabilidad en los resultados de los DRI, también se siguió las recomendaciones de la guía adoptada por el Instituto Nacional de Salud (ILAC -G24 OIML D10, 2007) en la que describe los métodos que permiten extender un intervalo de calibración de manera confiable.

<sup>20</sup> Fuente: <https://www.microsoft.com/es-co/microsoft-365/onedrive/online-cloud-storage>

<sup>21</sup> Fuente: <https://developers.google.com/chart?hl=en>

### **3.4.1 Verificaciones rutinarias**

Estas se llevaron a cabo durante el intervalo entre calibraciones con una frecuencia definida, se encuentran estructuradas en el Anexo I. Las pruebas son las siguientes:

#### **3.4.1.1 Inspección inicial**

Se examinó las condiciones físicas de cada detector de radiación ionizante [81], con el fin de detectar oportunamente algún daño. Se prestó atención a la envoltura del sensor (si fuese posible) para detectar signos de abolladuras o perforaciones. De igual manera se verificó el estado de la batería de alimentación de los equipos, con el fin de evaluar si se mantiene un voltaje adecuado durante toda la operación del instrumento, según las especificaciones del fabricante, asimismo, se verificó la activación visual y/o sonora del umbral establecida para alarma y/o alerta [82]. Los resultados de las inspecciones se organizaron según el número de verificaciones y el número de daños (figura 4.5). Las verificaciones se registraron en la lista de chequeo como se aprecia en el Anexo H.

Los materiales utilizados para las verificaciones rutinarias fueron un multímetro digital, una fuente radiactiva (tipo gotero y/o plana) y el diagrama donde se señala la ubicación del daño físico presentado, todo esto se encuentra en el formato de registro correspondiente a cada equipo. Se consideró la tolerancia del voltaje de la batería estuviera por encima del 70% del valor nominal con el fin de garantizar que el equipo sea funcional. La frecuencia establecida para la inspección física fue trimestral y la revisión de batería cada seis meses.

#### **3.4.1.2 Certificados de calibración**

Siguiendo las recomendaciones de la norma ISO/IEC/NTC 17025, la cual establece las características más relevantes que debe llevar un certificado de calibración, se evalúa que el certificado, muestre de manera correcta esta información. Se inició la inspección de los certificados vigentes, entre la información más relevante de estos se tomó en consideración:

- El nombre del laboratorio que realizó la calibración
- El número del certificado
- Los datos de usuario y equipo
- El modo y método de calibración utilizado
- Los patrones de referencia utilizados
- La fecha de operación y vigencia del certificado

- El responsable de la evaluación
- Los rangos de calibración de cada equipo deben ser acordes a los rangos de operación en la FVL.

Posteriormente, se recopiló el histórico de los certificados de calibración de cada detector según su modo de operación, para luego realizar su interpretación por medio de gráficos y evaluar si estos se encuentran dentro del rango tolerancia definido del  $\pm 20\%$  [4], los resultados deben tener una constancia en el tiempo, esta revisión permite soportar la extensión de los intervalos de calibración de acuerdo al método 1 de la normativa ILAC G24 OIL D10 adoptada por el Instituto Nacional de Salud (INS). La periodicidad de esta revisión varió en función de cada calibración de los equipos.

Los datos para contaminación superficial y para exposición radiactiva fueron evaluados en función de la fecha de calibración, en términos de eficiencia y factor de calibración, respectivamente. Se validó el resultado del certificado (eficiencia o factor de calibración) que se generó a partir de las mediciones reportadas, comparando los valores experimentales con los de referencia.

#### **3.4.1.3 Constancia**

Se verificó la constancia en las lecturas de cada detector ante fuentes radiactivas patrón de Cs-137 tipo gotero y plana (figura 2.2 e y c), representada mediante un gráfico con todos los datos de los registros del equipo en función de la fecha de medición (figuras 4.9, 4.10 y 4.11). Las mediciones deben guardar una estabilidad en el tiempo conservándose dentro del error máximo permitido del  $\pm 10\%$ , y se realizan con una frecuencia de acuerdo a la matriz de calificación (Anexo D), en caso de algún daño, la frecuencia de revisión aumenta hasta garantizar que el equipo funciona adecuadamente

#### **3.4.1.4 Exactitud**

La exactitud es un parámetro que permite conocer que tan cercanas son las medidas de los equipos al valor considerado como nominal. Se comparó el resultado de las mediciones, con el valor considerado como verdadero, de tal manera que se verificó si se encuentra dentro del rango tolerable de  $\pm 30\%$  [4], [54], [55], (este valor es aplicable a procesos de verificaciones). Se utilizó fuentes patrón de Cs-137 tipo gotero y plana (figura 1.5 e y c) según el modo de operación del equipo, teniendo en cuenta las características de las fuentes (tabla 3.3). La



estimación de valores de referencia para las magnitudes de operación de los equipos, tiene correcciones por decaimiento radiactivo, para lo cual, se tuvo en cuenta los datos técnicos que aportan los certificados de calibración para cada modelo de fuente (tabla 3.4).

Los valores de referencia se establecieron de la siguiente manera:

- a) Para contaminación superficial ( $\text{Bq/cm}^2$ ) se calculó el valor esperado (ecuación 2.3) teniendo en cuenta la tasa de emisión superficial ( $S_A$ ), este valor se encontró en el certificado de calibración de la fuente de Cesio 137 tipo plana. Se comparó los valores calculados a partir de esta ecuación y se verificó que se encuentren dentro de la tolerancia permitida (figura 4.12).
- b) Por su parte, para calcular exposición radiactiva ( $\dot{X}$ ) se utiliza la ecuación 2.7 [48], [50] que describe las características de la fuente de radiación de Cs-137 teniendo en cuenta sus características (tabla 3.3). Estos cálculos permitieron obtener valores de referencia, los cuales sirvieron para comparar el valor medido en los equipos y de esta manera conocer el desempeño de los mismos (figuras 4.13 y 4.14). A partir de estos valores, se obtuvo la exposición en unidades de  $\mu\text{Sv/h}$  a una distancia 'a' de 0,10 m desde la fuente hasta la zona efectiva del detector, se consideró solamente la interacción de la fuente con el detector. Los valores de los parámetros necesarios para calcular la exposición radiactiva y los valores de referencia se presentan a continuación:

Tabla 3.5 Valores de referencia para determinación de exposición radiactiva

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidades
Factor gamma [83] [49]	G	7,789E-05	$\text{mSv/h*MBq}$
Concentración de actividad	$C_v$	3,52E+05	$\text{MBq/m}^3$
Volumen [84]	V	2,00E-05	$\text{m}^3$
Coefficiente lineal de absorción [85] [86]	U	6,98	$\text{m}^{-1}$
Grosor	T	2,62E-02	m
Radio [84]	R	0,0156	m
Densidad [87]	P	1,88E+06	$\text{g/m}^3$
Diámetro [84]	D	31,2	mm
Energía [83] [88]	E	600	keV
Coefficiente másico de absorción [88]	$\mu_{\text{en}}/\rho$	3,72E-06	$(\text{m}^2/\text{g})$

Los resultados se registraron en los formatos diseñados para cada instrumento (Anexo H). Las mediciones deben guardar una constancia en el tiempo, conservándose dentro del error máximo permitido y se realizan con la misma frecuencia definida en la prueba de constancia (Anexo D).

#### **3.4.1.5 Precisión**

A partir de los registros anteriores en las mediciones con los diferentes detectores, se calculó la desviación estándar (ecuación 2.9), se evaluó la variación entre mediciones realizadas en un mismo procedimiento, es decir qué tan reproducible es la medida, se comparó este resultado con el valor promedio de las mediciones.

Se verificó si los resultados se encuentran en el rango considerado como tolerable de  $\pm 10\%$  (figura 4.15, 4.16 y 4.17). La frecuencia con que se realizó esta prueba es la misma de la prueba de constancia (Anexo D). Los resultados se registraron en el respectivo formato de cada instrumento para contaminación superficial y para exposición radiactiva (Anexo H).

#### **3.4.1.6 Dependencia direccional**

Se realizaron registros de exposición radiactiva con dependencia direccional, estas mediciones permiten conocer la variación de la respuesta del equipo según el ángulo de incidencia de la fuente radiactiva, los valores de los ángulos de incidencia a evaluar fueron de  $\pm 60^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $\pm 45^\circ$  tomando como referencia ( $0^\circ$ ) la línea verde entre el detector y la fuente (figura 3.11 c) [73].

Este tipo de prueba, es necesario después de cualquier reparación que pueda afectar la respuesta del instrumento, y cuando el instrumento es nuevo.

Esta prueba aplica solamente para mediciones de exposición radiactiva, se llevó a cabo usando una fuente radiactiva de Cs-137 tipo gotero. Las tolerancias en las medidas de exposición radiactiva consideradas para las condiciones de la FVL fueron  $\pm 20\%$  y  $\pm 30\%$  para los ángulos de  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 60^\circ$  respectivamente [12], [13]. Los resultados se presentan a manera de gráficos (figura 4.18 y 4.19), los registros individuales se guardan en el formato diseñado para cada detector (Anexo H).



Figura 3.11 Montaje experimental para medición de exposición radiactiva direccional. a) medidas realizadas en la ubicación 0°. b) medida realizada con una angulación de 60°. c) pieza modular giratoria que permite ajustar los ángulos de medición.

### 3.4.2 Verificaciones inmediatas

Teniendo en cuenta que durante los procesos de calibración, los equipos deben ser trasladados a los laboratorios de calibración, estos tienden a pasar por varias y largas etapas donde intervienen distintas personas ajenas a la FVL, lo que implica que los equipos puedan sufrir daños debido a que son manipulados, inspeccionados y trasladados en lugares como aeropuertos, aduanas, servicio de transporte, laboratorios, etc. [8]. Es así como las verificaciones inmediatas hacen parte del aseguramiento metrológico, estas se realizaron para conocer el estado de salida y recepción de los equipos en la FVL, especialmente cuando son enviados a los laboratorios de calibración, estas pruebas también se implementaron ante la adquisición de equipos nuevos en la institución, con el fin de evaluar el funcionamiento inicial y validar su uso en los servicios.

A continuación, se describen los procedimientos realizados en cada una de las tres pruebas que se definieron:

#### 3.4.2.1 Inspección inicial

En esta prueba se realizó la inspección física del equipo, pruebas de activación de alerta y/o alarmas ante una fuente radiactiva, revisión de la batería o fuente de alimentación y la respuesta correcta del equipo ante una indicación dada, todo esto con el fin de evaluar el correcto funcionamiento del equipo antes y después del trasladarlo a los laboratorios de

calibración. Todos los daños se reportaron inmediatamente en los respectivos diagramas como se muestra en el Anexo H.

#### **3.4.2.2 Certificados de calibración**

Se validó los datos más significativos de acuerdo a lo expresado en ISO/IEC/NTC 17025 en el certificado de calibración de cada equipo, además se analizó la coherencia en los resultados reportados dependiendo de los modos de operación de cada equipo.

#### **3.4.2.3 Constancia**

Para validar la constancia en las medidas se realizó 5 mediciones de exposición radiactiva y/o contaminación superficial, se analizó la estabilidad que presentaron las medidas en la salida y el ingreso del equipo a la FVL considerando una tolerancia del  $\pm 10\%$ . Los datos obtenidos y su comparación se representan a manera de gráficos (figura 4.22 y 4.23). En el Anexo H se presenta el formato de registro utilizado.

### **3.5 Criterios de evaluación para definir la frecuencia de la verificación metrológica**

Para establecer la periodicidad de las pruebas de constancia, exactitud y precisión se consideró las características de operación para cada equipo como: tiempo en servicio, entorno de uso, frecuencia de uso [12], y criticidad [39], los criterios de evaluación se realizaron asignando puntuaciones que van de 0 a 25 [89] a cada una de las cuatro características, al final, la puntuación del equipo viene dada por la suma de las puntuaciones individuales de las características dando como resultado una puntuación que va de 0 a 100, donde 0 representa que el equipo presenta una buena respuesta y por tanto no necesita verificaciones frecuentes; y 100 representa un equipo con tendencia a tener fallos en sus registros y por tanto necesita verificaciones más frecuentes. A continuación, se presentan las consideraciones que se tuvieron en cuenta para asignar una puntuación a cada característica.

#### **3.5.1 Tiempo en servicio**

Esta información se obtuvo de las especificaciones del equipo que se encontraron registradas en la plataforma para gestión de procesos SAP<sup>22</sup> de la institución. Para asignar el puntaje que

---

<sup>22</sup> SAP: Desarrollo de Programas de Sistemas de Análisis

va de 0 a 25 se tuvo en cuenta la antigüedad de los equipos, siendo el equipo con mayor antigüedad al que se le asigna un puntaje 25 y el equipo más nuevo quien tuvo un puntaje de cero, así este periodo se divide en cuatro rangos con sus respectivos intervalos de calificación de la siguiente manera:

El primer rango corresponde a equipos nuevos con tiempo en servicio menor a 2,4 años, el segundo rango es para equipos que llevan entre 2,5 y 4,9 años de uso, el tercer rango acoge equipos con uso en la institución entre 5 y 7,4 años, finalmente el último intervalo es para los equipos más antiguos con puesta en servicio superiores a 7,5 años en adelante.

Tabla 3.6 Puntuación por tiempo en servicio

Intervalos de tiempo [años]			Puntaje
0.0	a	2.4	6.25
2.5	a	4.9	12.50
5.0	a	7.4	18.75
7.5 en adelante			25.00

### 3.5.2 Entorno de uso

Dependiendo del área donde se utiliza el equipo y teniendo en cuenta el rango de energía de la radiación ionizante, se asignó la respectiva calificación (tabla 3.7).

Tabla 3.7 Áreas de aplicación de medidores de radiación en hospitales con rangos de energía de radiación aproximada<sup>23</sup>.

Área	Ejemplo de aplicación	Tipo de radiación	Rango de energía aproximado (min-max)	Puntaje
Imágenes diagnósticas	Fugas y dispersión del tubo de las máquinas de rayos X	Rayos X	10 – 150 keV	8.3
Medicina nuclear	Contaminación por isótopos radiactivos. Control de pacientes con ingesta de isótopos radiactivos	$\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$	$\alpha$ : 5 – 8 MeV $\beta$ : 30 keV – 3 MeV $\gamma$ : 30 keV – 1.25 MeV	16.7
Radioterapia	Fugas y dispersión de aceleradores lineales	Rayos X (neutrones)	100 keV – 24 MeV	25.0

<sup>23</sup> Fuente: Radiation survey meters in hospitals : technology , challenges , and a new approach, pp. 1–8

### 3.5.3 Frecuencia de uso

Una característica de los equipos es la periodicidad de su uso, los equipos fijos se encuentran activos realizando registros continuos, estos operan todo el día, también se cuenta con equipos los cuales son usados durante periodos de tiempo más cortos, como los detectores portátiles. De acuerdo al tiempo estimado de uso del equipo en los diferentes servicios, se calificó según la siguiente asignación de puntajes:

Tabla 3.8 Puntajes por tiempo de uso

Tiempo de uso (h)	Puntaje
6	6.25
12	12.50
18	18.75
24	25.00

### 3.5.4 Criticidad

La criticidad indica qué tan importante es la operación del equipo, su evaluación se realiza teniendo en cuenta las estrategias para definir un plan de confirmación metrológica [38].

Se evaluó si el equipo se considera como patrón de referencia, el cual puede ser utilizado para verificación de otros equipos, por otro lado, si se puede considera como equipo de trabajo primario, el cual es utilizado para obtener mediciones de primera importancia en la toma de decisiones, o puede considerarse como equipo de trabajo secundario que proporciona resultados de apoyo, realizando mediciones indirectas, finalmente se evalúa si el equipo se hace parte del grupo de equipos de seguimiento y monitoreo los cuales tienen un impacto mínimo o moderado en los resultados.

Con base en la criticidad establecida, se puede generar un panorama general de OCM aplicables a los equipos. A continuación, se observan los 4 parámetros para la evaluación de criticidad con su respectivo puntaje.

Tabla 3.9 Puntuación por criticidad del equipo

<b>Clasificación</b>	<b>Puntaje</b>
Patrón de referencia	6.25
Equipos de trabajo primarios	12.50
Equipos de trabajo secundarios	18.75
Equipos de seguimiento y monitoreo (auxiliares)	25.00

### 3.6 Frecuencias de verificación

El periodo de verificación finalmente se define, de acuerdo a la puntuación obtenida (de 0 a 100 puntos) posterior a la evaluación de los criterios anteriormente descritos, el valor de la puntuación indica la frecuencia (en meses) de las operaciones para verificar los equipos, esta calificación se realiza de la siguiente manera:

Tabla 3.10 Puntajes para asignación de frecuencia en verificación

<b>Intervalos de calificación</b>			<b>Meses</b>
0	a	24	12
25	a	49	9
50	a	74	6
75	a	100	3

La evaluación de todos los equipos se encuentra definida en el Anexo D.

#### 3.6.1 Extensión de intervalos de calibración

Fundamentados en la Norma Técnica Colombiana NTC-17025, la cual muestra que los intervalos de calibración no son estrictamente los que se encuentran en los certificados, y por tanto, es válido extenderlos cuando estos sean justificados con procesos de verificación metrológica [36]. Ante esto, se siguió las recomendaciones de la guía ILAC G24 OIL D10 adoptada por el Instituto Nacional de Salud (INS), en la que se presentan los métodos para extender los intervalos de calibración. Dos de los cinco métodos presentados, se ajustan a las condiciones de operación en la Fundación Valle del Lili, esto permite fortalecer las operaciones de confirmación metrológica.

- a. **Método 1:** Permite evaluar el resultado de los certificados de calibración, de tal manera que si este se encuentra dentro del valor considerado como tolerable, el siguiente intervalo es extendido, por el contrario, se reduce el intervalo si el resultado se encuentran fuera de dicha tolerancia.
- b. **Método 4:** Este procedimiento brinda información en el periodo comprendido entre calibración y calibración, se realiza verificaciones con una frecuencia definida comparando la respuesta del instrumento ante un patrón de referencia, si el instrumento se encuentra fuera de la tolerancia definida se realiza la calibración habitual.



# Capítulo 4

## Resultados y análisis

#### 4.1 Clasificación de Equipos

A partir del inventario para zonas de trabajo con radiación ionizante utilizados en la FVL, los equipos se clasificaron de acuerdo a su condición inicial en: i) “no usado” que corresponde a un 4% del total de instrumentos equivalente a 5 equipos; ii) “no requieren calibración” con un porcentaje de 27% (30 equipos) donde se encontraron equipos como activímetros, algunas cámaras de ionización, fantomas<sup>24</sup> (maniquís) y diodos; iii) “requieren calibración” con un 69% equivalente a 77 equipos (figura 4.1), de este grupo hicieron parte equipos como detectores de estado sólido, algunas cámara de ionización, electrómetros y detectores de radiación ionizante gaseosos como: sondas GM, monitores de radiación de manos y pies, dosímetros de lectura directa, monitores de radiación de área y detectores GM portátiles.

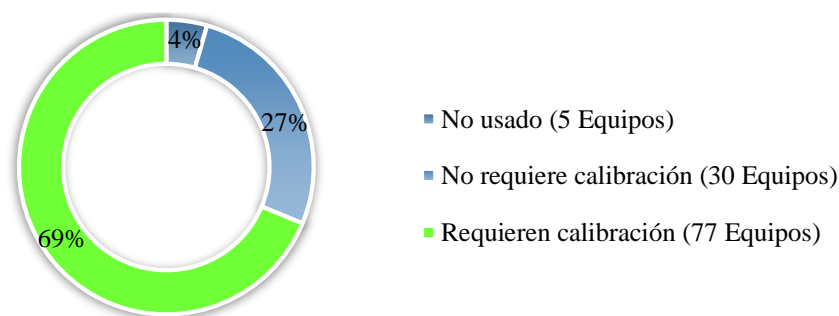


Figura 4.1 Clasificación de los equipos en zonas de interacción con radiación ionizante

Este trabajo de investigación se centra en los detectores que “requieren calibración”, correspondiente al mayor porcentaje con un 69%. Este grupo nuevamente se clasificó en “DRI gaseosos tipo GM”, grupo que correspondió a un 64,94% es decir 50 detectores (Anexo A), un segundo grupo denominado “otros equipos a verificar” con un 24,68% (19 equipos) que corresponde a cámaras de ionización, electrómetros y detectores de estado sólido, y un último grupo denominado “otros detectores” con un 10,39% (8 equipos) donde se encuentran los sensores Raysafe, Octavios 4D y Quick Check (figura 4.2).

<sup>24</sup> Fuente: <https://revistadefisicamedica.es/index.php/rfm/article/download/210/200/430>

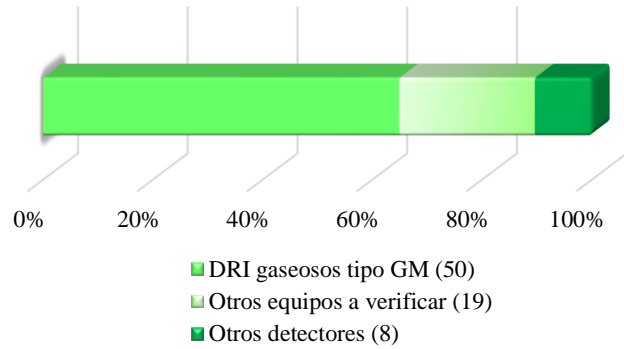


Figura 4.2 Clasificación de los detectores que requieren calibración

El grupo de DRI gaseosos GM se clasificó de acuerdo a su condición de uso en detectores fijos y portátiles (figura 4.3). Los detectores fijos son representados en color azul y sus correspondientes familias fueron: sondas GM con un total de 25 equipos, monitor de área (8 equipos), y monitor de radiación de manos y pies (4 equipos). Los detectores portátiles son representados en color verde y sus familias son: detectores GM portátil (7 equipos), y dosímetro de lectura directa (6 equipos). Se observa que el grupo con mayor cantidad de detectores pertenece a los equipos fijos y a la familia sondas GM, debido a que estos detectores son ampliamente usados en diferentes áreas como radiofarmacia, medicina nuclear y braquiterapia.

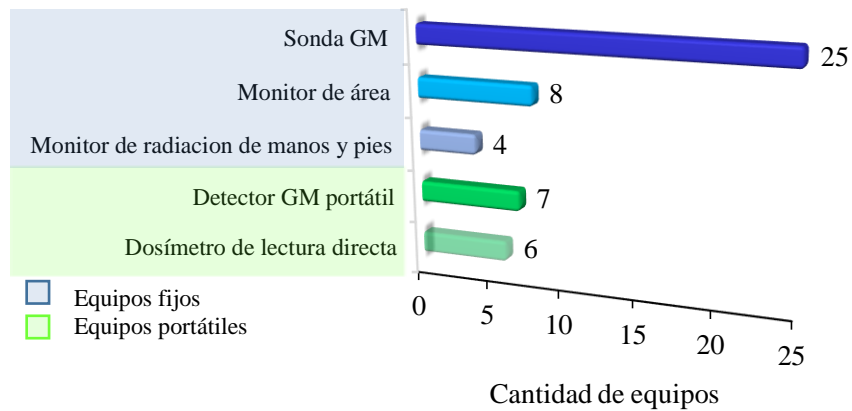


Figura 4.3 Clasificación de los DRI gaseosos por familias de equipos y su condición de uso

Los DRI gaseosos utilizados en la FVL se encuentran en diferentes áreas como: braquiterapia con equipos como una sonda GM, dos detectores portátiles GM y un monitor de área; en

medicina nuclear equipos como detector de radiación de manos y pies, sondas y monitores GM (9 detectores), PET/CT equipos como monitores portátiles y monitores de área (8 equipos); radiofarmacia equipos como sondas GM en su mayoría, detector de radiación de manos y pies y monitores GM (27 detectores); y en radioterapia con un dosímetro personal y un detector de área (figura 4.4). Se observó que la zona donde se concentran la mayoría de los detectores gaseosos fue radiofarmacia, por lo que se hace necesario dar prioridad a las verificaciones de los equipos en esta área.

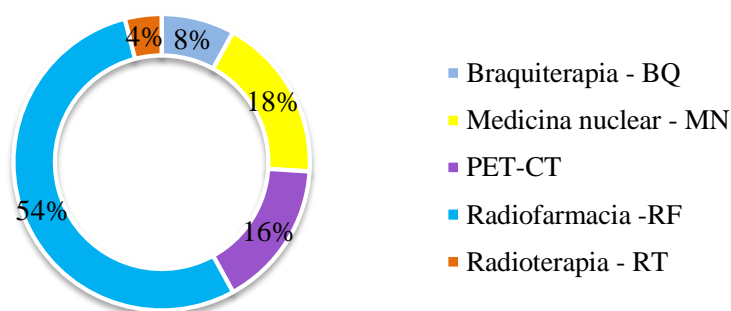


Figura 4.4 Distribución de detectores gaseosos de la FVL por áreas o servicios.

## 4.2 Verificaciones

Debido a que fueron muchos detectores con los que se trabajó, se decidió denotar a cada equipo con un número que va de 1 a 50 (Anexo A), por ejemplo, el equipo 1 corresponde a una sonda GM marca Graetz 18550C, y el equipo 50 corresponde a un dosímetro de lectura directa marca Ludlum modelo 25-IS-1, no se verificaron 5 sondas que hacen parte del inventario y un detector de manos y pies que llegó a institución con averías procedente de calibración, las cuales se reportaron en la forma de registro (Anexo H), además los detectores de manos y pies se manejan independientemente y su numeración es la misma ya que son parte de un solo equipo, esta clasificación se encuentra en el Anexo A. Las frecuencias de operación se definen en cada prueba.

## 4.3 Verificaciones rutinarias

### 4.3.1 Inspección inicial

Se representó el número de inspecciones iniciales que se realizaron a los 50 detectores de radiación gaseosos GM (figura 4.5). En esta gráfica el color verde indicó los equipos que no presentaron ningún tipo de falla al ser verificados, los equipos que presentaron inspecciones donde se detectaron fallas se presentan en color rojo, por ejemplo los equipos 35 M y 35 P corresponden a detectores de manos y pies, estos se trabajaron de manera independiente con la siguiente convención: detector de manos 35M y detector de pies 35P, los cuales presentaron golpes al regreso de calibración, el sensor de manos llegó roto y el equipo actualmente no está en servicio. El equipo 28 corresponde a un monitor de radiación de área, el cual tiene su batería de respaldo descargada, posiblemente dañada. Fueron pocos los daños registrados durante la ejecución de la verificación metrológica de los mismos, en general, los equipos que cuentan con 1 o 2 inspecciones no se encuentran en uso activo y por esta razón se dio prioridad a los equipos de mayor uso. La frecuencia con que se llevó a cabo la inspección física fue trimestral, las baterías se revisaron cada seis meses.

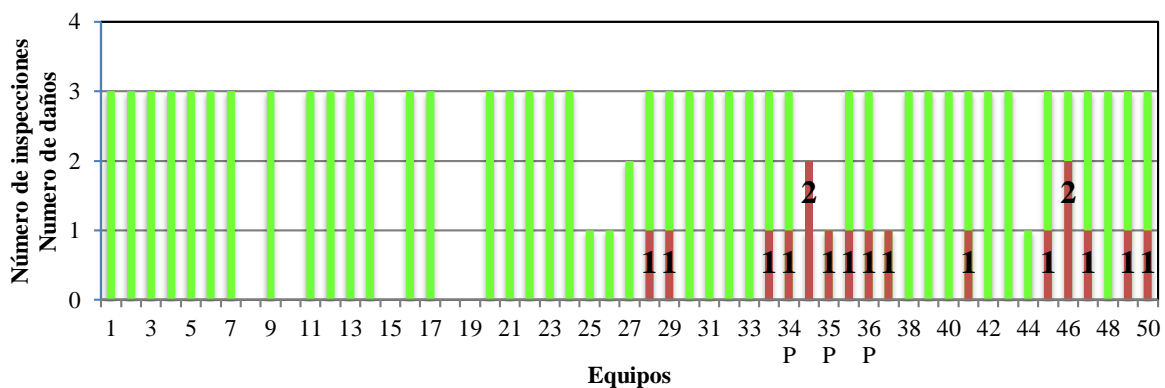


Figura 4.5 Inspección inicial y daños

### 4.3.2 Certificados de calibración

Para realizar la evaluación de los equipos, fue importante tener en cuenta aspectos de los certificados de calibración como, las fechas de vigencia de calibración de cada equipo (figura 4.6), y la constancia en los resultados (figura 4.8). En el primer gráfico, se tiene como referencia la fecha actual (línea azul punteada) para evaluar los certificados que se encuentran vencidos, de acuerdo a la frecuencia de envío habitual (anual). Según este gráfico, los equipos cuyas calibraciones están vencidas, son presentados bajo la línea azul punteada, y

corresponden a 32 equipos equivalente a un 64% del consolidado total, por otro lado, los equipos que aún tienen calibraciones vigentes representan un 36% de la instrumentación en estudio, y muchos de ellos están próximos a vencer. Esta información proporcionó un panorama general del estado de las calibraciones, logrando identificar los equipos que requieren con mayor urgencia procesos de calibración y verificación metrológica, para garantizar su buen funcionamiento. El color rojo representa los equipos que no se verificaron.

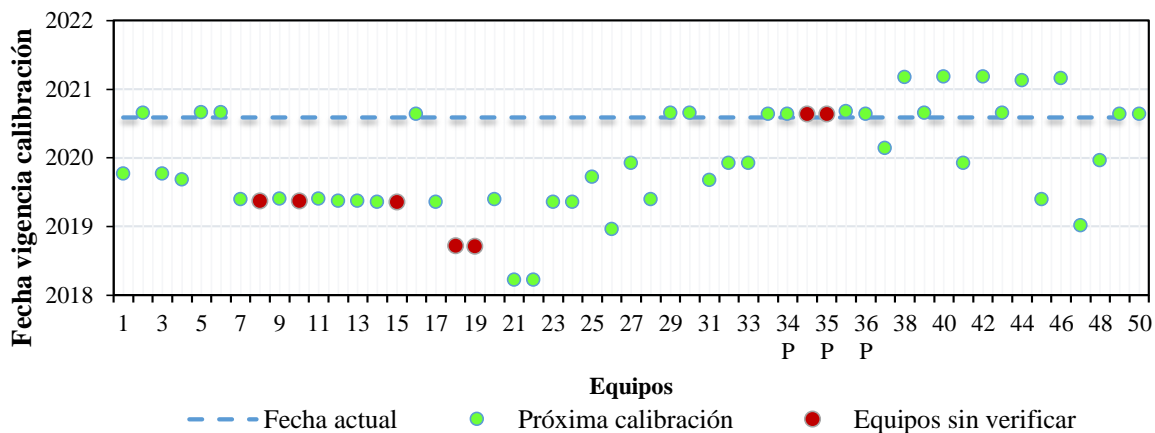


Figura 4.6 Consolidado calibración DRI

De igual manera, se presenta el consolidado global de las últimas calibraciones, estos se encuentran clasificados por años, aquí se aprecia que solamente el 10% de los detectores cuentan con certificado de calibración que se obtuvo en el 2021.

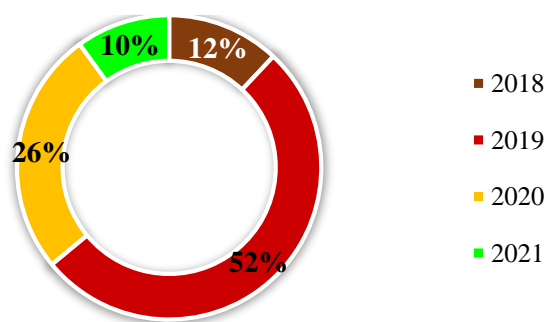


Figura 4.7 Últimas calibraciones por año

El gráfico que representa la constancia en las calibraciones se obtuvo a partir de la revisión del histórico de los resultados en los certificados de calibración (figura 4.8), en él se muestran

las tres magnitudes de interés que se estudiaron: de color rojo contaminación radiactiva, de color azul exposición ambiental y de color verde exposición personal, también se encuentran equipos que operan en dos modos diferentes (equipos 38 al 44), se presta especial atención a los equipos que cuentan con 2 o más valores que presentan constancia, esto correspondió a 37 equipos equivalente a un 74% de la instrumentación verificada. La evaluación y el ajuste de los intervalos de calibración se realizó según los modelos de organismos como la Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios (ILAC) y la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) presentados en la guía ILAC-G24 / OIML D10 [37], teniendo en cuenta el método 1: Ajuste automático (método escalera).

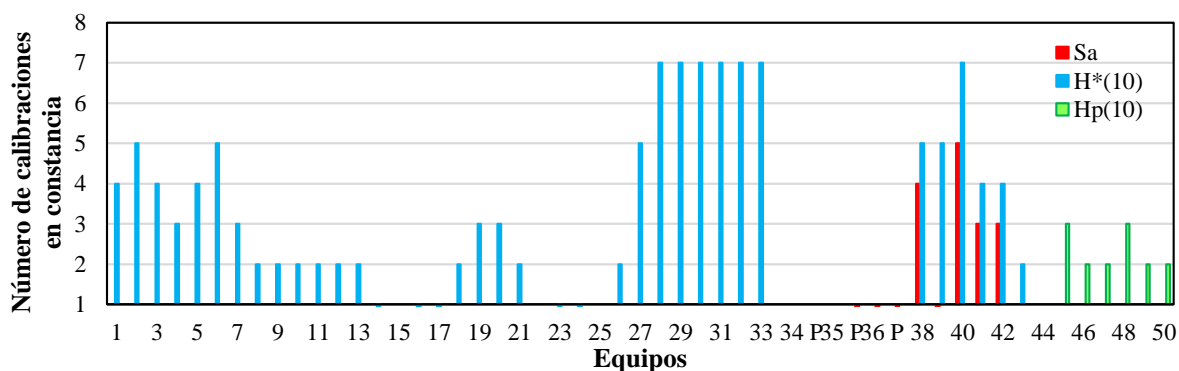


Figura 4.8 Constancia en calibraciones

### 4.3.3 Constancia

Para evaluar la estabilidad de los detectores durante el transcurso de su vida útil, se realizó una verificación periódica que busca evaluar la respuesta de los detectores ante una fuente de radiación ionizante. Para una mejor ilustración se dividió los resultados de acuerdo a las magnitudes a verificar así: i) constancia en contaminación superficial, ii) exposición radiactiva ambiental y iii) exposición radiactiva personal, teniendo en cuenta equipos portátiles y fijos. En las siguientes gráficas se presenta la respuesta de un solo detector que describe de manera general el comportamiento del equipo dependiendo del modo de operación en función de las fechas en que se realizaron las mediciones. Las frecuencias para llevar a cabo esta prueba, se obtuvieron de acuerdo al puntaje ponderado a partir los criterios de evaluación para cada detector, los cuales se encuentran en el Anexo D.

### a. Contaminación superficial

En esta etapa se analizaron los detectores de contaminación superficial correspondiente a 11 equipos. El comportamiento de las mediciones permite ver la constancia de las lecturas. Para los equipos fijos se observa el comportamiento que tuvo el detector 34M, un monitor de radiación de manos marca Ludlum, modelo 177, este equipo durante aproximadamente 6 meses, presento mediciones que se encuentran dentro del rango de tolerancia del  $\pm 10\%$ , este rango se establece a partir del promedio de los registros durante las 10 primeras de mediciones, el equipo presentó una buena constancia durante el intervalo de tiempo evaluado; la desviación estándar de las mediciones acompaña los registros en la gráfica. En la respuesta de los 11 equipos en su totalidad, muestran buena constancia a excepción de los registros para el equipo 36M (figuras 7.1 y 7.2, Anexo B), que corresponde a un detector de radiación de manos el cual presentó fluctuaciones en sus medidas muy evidentes, después de varias verificaciones se encontró que este problema está relacionado con la alimentación inadecuada del detector por parte del monitor, ya que en los manuales se indica que los detectores funcionan con un voltaje cercano a los 900 V y el monitor solo proporciona valores aproximados a 500 V. Cabe destacar que los detectores 36M y 36P presentaron mayor número de verificaciones debido a que el equipo presentó una advertencia en el monitor, que posteriormente se detectó como la falla anteriormente mencionada.

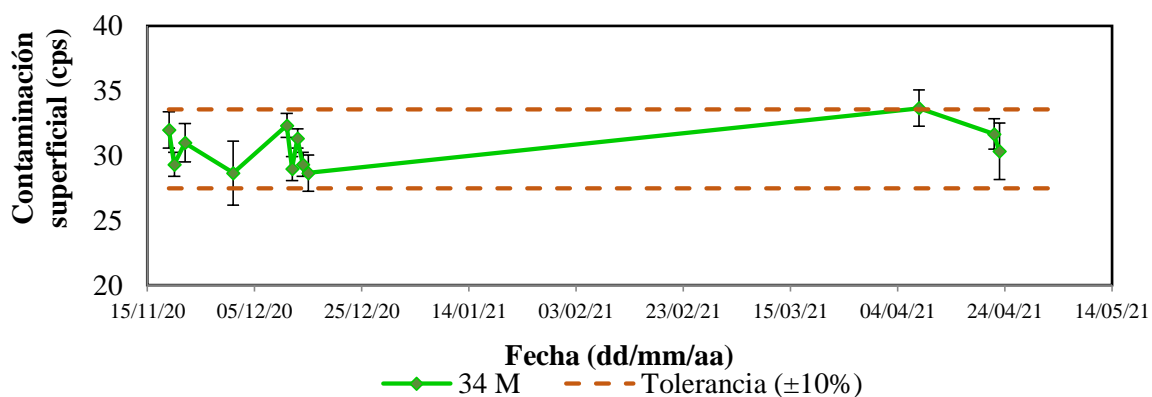


Figura 4.9 Constancia en contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies

Las mediciones de contaminación superficial para los equipos portátiles se encuentran en el Anexo B, estos equipos tienen detectores de ventana pequeña, en los cuales la constancia fue buena, excepto para los detectores 38 y 39 correspondiente al equipo *Inspector Radiation*



*Alert SE International* y Fluke GM modelo 990S respectivamente, estos detectores son los que presentan un mayor tiempo de operación en la institución, cercano a 11 años, por lo que se puede considerar como normal que tenga una fluctuación más significativa en sus mediciones. El equipo 44 que corresponde de al detector Fluke GM 993, tiene menos verificaciones porque corresponde a un equipo nuevo que ingresó al servicio de medicina nuclear.

#### **b. Exposición ambiental**

A continuación, se presenta la respuesta de las medidas de exposición ambiental para el equipo 38 (figura 4.6) que corresponde al detector portátil *Inspector Radiation Alert SE International*, el tiempo aproximado de verificaciones realizadas para este equipo fue 5 meses, en ese tiempo el equipo presentó mediciones dentro del rango de tolerancia que evidencia una constancia adecuada. Las respuestas del consolidado de equipos, pueden ser observadas en las gráficas del Anexo B, en ellas se encontró que los detectores fijos como las sondas GM número 6 y 12 no muestran un buena constancia, estos equipos deben ser revisados con mayor frecuencia. En esta misma familia de detectores, se encontró que el monitor de área número 27 ubicado en braquiterapia, muestra mediciones irregulares, este equipo generó la señal de advertencia “OL” que indica sobrecarga, se hizo seguimiento los siguientes días y el equipo respondió con normalidad, este detector es el que más verificaciones presentó debido al error anteriormente mencionado; el grupo de detectores portátiles mostró buena constancia en general, excepto para el detector 39 (Geiger Müller Fluke 990S) que presentó un cambio notable en la constancia de las mediciones de marzo de 2021.

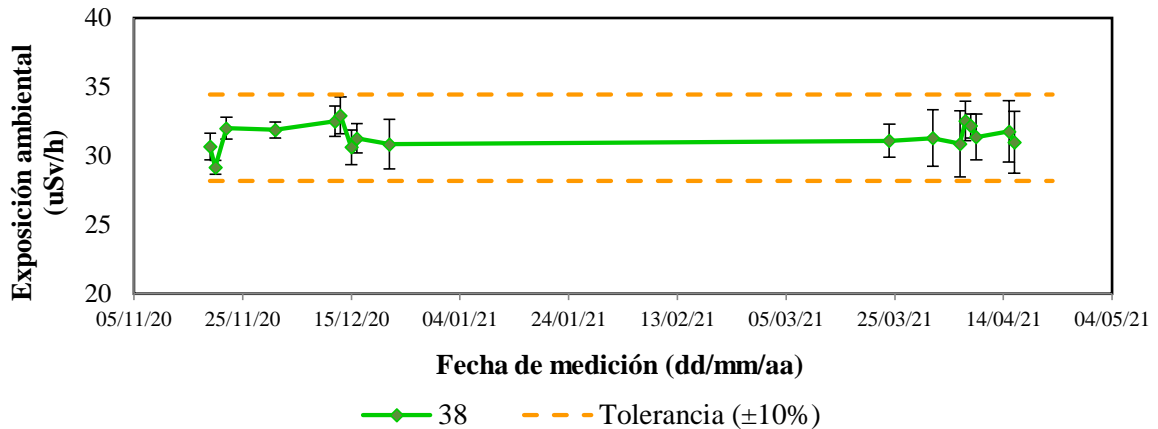


Figura 4.10 Constancia en exposición ambiental - Detector GM portátil

### c. Exposición personal

La evaluación de los dosímetros de lectura directa, los cuales muestran registros de exposición personal, se indican en el Anexo B, los registros independientes para los detectores se presentaron en sus respectivos formatos como el que se describe a continuación, este es el detector 45 marca Ludlum modelo 25-IS-01, con registros en constancia que denotan un buen comportamiento del equipo en aproximadamente 6 meses de seguimiento, el gráfico muestra la desviación estándar para cada conjunto de mediciones.

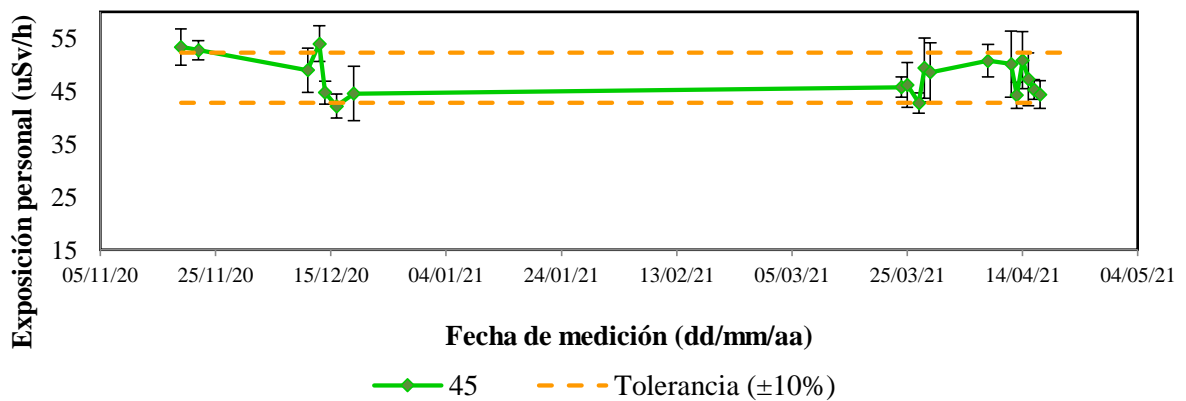


Figura 4.11 Constancia en exposición personal - Dosímetro de lectura directa

#### **4.3.4 Exactitud**

En este caso, se analizó la exactitud para un grupo de detectores en cada modo de operación verificado. La tolerancia establecida para este caso fue de  $\pm 30\%$  del valor esperado y se representa con una línea punteada naranja, la línea azul representa el valor nominal para cada magnitud a verificar, en las gráficas a continuación, se presenta la respuesta de un solo detector que describe de manera general el comportamiento del equipo dependiendo del modo de operación en función de las fechas en que se realizaron las verificaciones. Los resultados del total de equipos se encuentran en el Anexo B. Las frecuencias para llevar a cabo esta prueba se definieron según el Anexo D.

##### **a. Contaminación superficial**

A continuación, se observa las mediciones de contaminación superficial para el equipo 34M que corresponde a un detector fijo de radiación de manos, se observa que, durante aproximadamente 6 meses de verificaciones sus medidas estuvieron dentro de la tolerancia y además gran parte de estos datos presentaron una desviación estándar aceptable por debajo del 10% (figura 4.12). Los detectores fijos muestran una respuesta aceptable, estos equipos fueron calibrados con fuentes de Cs-137 lo que permitió llevar a cabo la prueba de exactitud. Los resultados para este grupo de detectores mostraron que tres de ellos se encuentran dentro de la tolerancia, tan solo uno (36M) estuvo por fuera de la tolerancia, este equipo presentó fallas en el monitor donde se conectan los detectores. Los resultados para contaminación superficial no fueron satisfactorios para los detectores portátiles (figura 7.8), ya que no fue posible realizar esta prueba con los elementos que se tiene actualmente en la institución (fuente de Cesio 137 plana), los valores de los certificados de calibración no son comparables para la fuente de Cesio 137, por tanto, no se pudo realizar la corrección de las lecturas (factor de corrección beta) para que las mediciones sean evaluadas respecto al valor esperado.

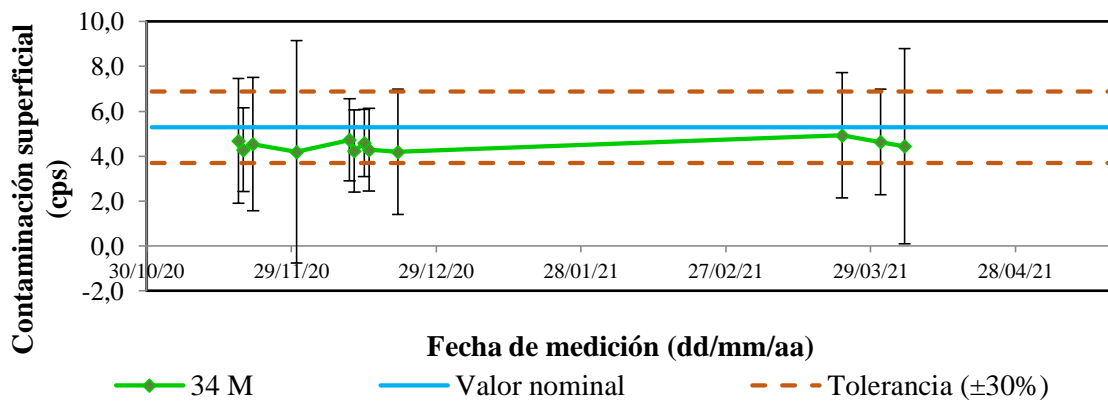


Figura 4.12 Exactitud en contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies

### b. Exposición ambiental

Los resultados para exposición radiactiva comparan las lecturas del equipo con valor considerado como verdadero, en este caso se verificó que los registros para el detector portátil GM Fluke modelo 993 se encuentran dentro de la tolerancia definida la cual se representa con la línea punteada naranja (figura 4.13), los registros se presentaron con su desviación estándar, los resultados de los 40 detectores que trabajan en esta magnitud se encontraron organizados de acuerdo al tipo de detector (Anexo B).

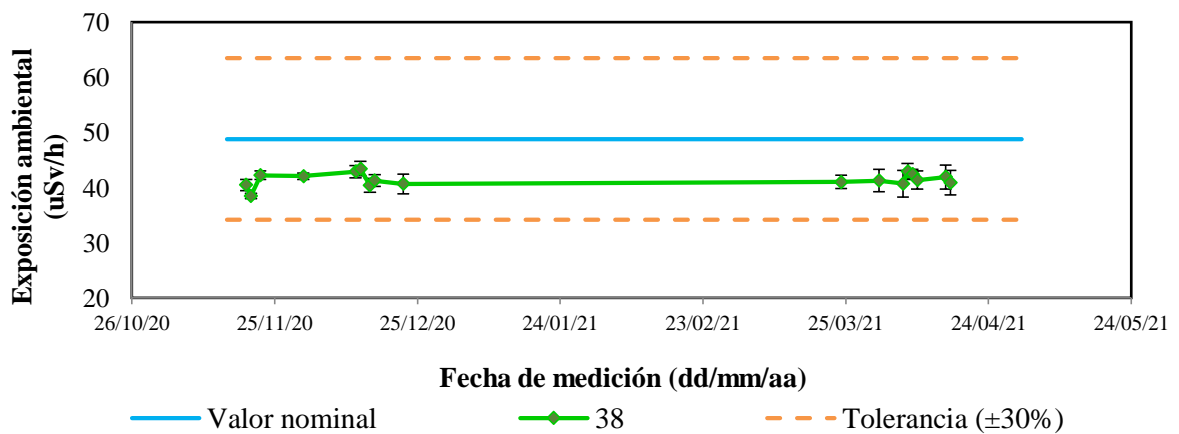


Figura 4.13 Exactitud en exposición ambiental - Detector GM portátil

### c. Exposición personal

Todos los resultados para este grupo de detectores (6 detectores) se encontraron dentro de la tolerancia definida, en este caso se presenta el dosímetro de lectura directa Ludlum modelo 25-IS-01, identificado con el número 45 en el inventario general, estos resultados se presentan con su desviación estándar, el consolidado final se encuentra en el Anexo B.

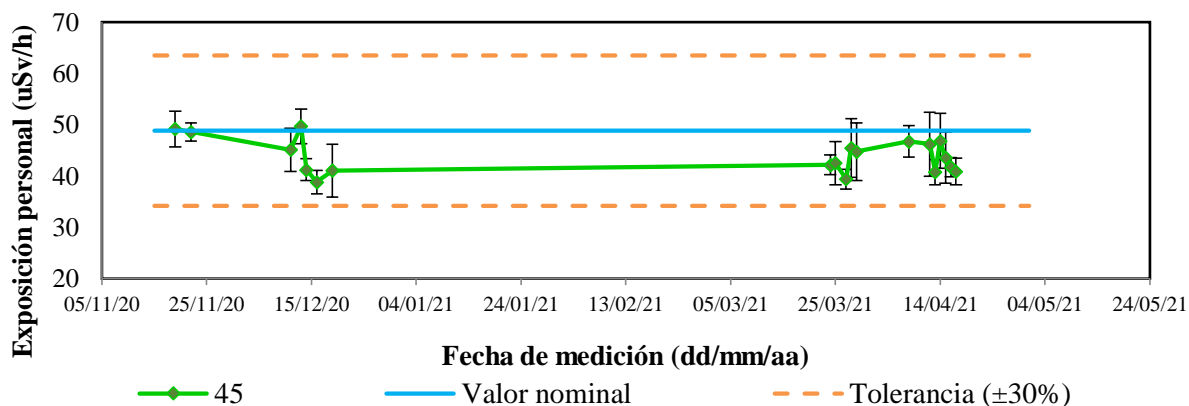


Figura 4.14 Exactitud en contaminación superficial - Dosímetro de lectura directa

#### 4.3.5 Precisión

La precisión en las mediciones de radiación para los equipos se evaluó por medio del análisis de la desviación estándar para cada medición. Se estableció para este caso una tolerancia del 10%, por debajo de este valor se considera que las mediciones son aceptables y se asegura la precisión del equipo. Las frecuencias para llevar a cabo esta prueba se encuentran en el Anexo D.

##### a. Contaminación superficial

Se presentan los resultados de precisión para contaminación superficial en función de la desviación estándar de las medidas (figura 4.13), para el detector 34M, un monitor de radiación de manos marca Ludlum, modelo 177, se observó que las desviaciones estándar de las medidas estuvieron dentro del rango de tolerancia, lo que indicó que el grupo de mediciones realizadas en cada verificación tuvo valores muy próximos, es decir la dispersión de las medidas no fue grande y garantiza respetabilidad.

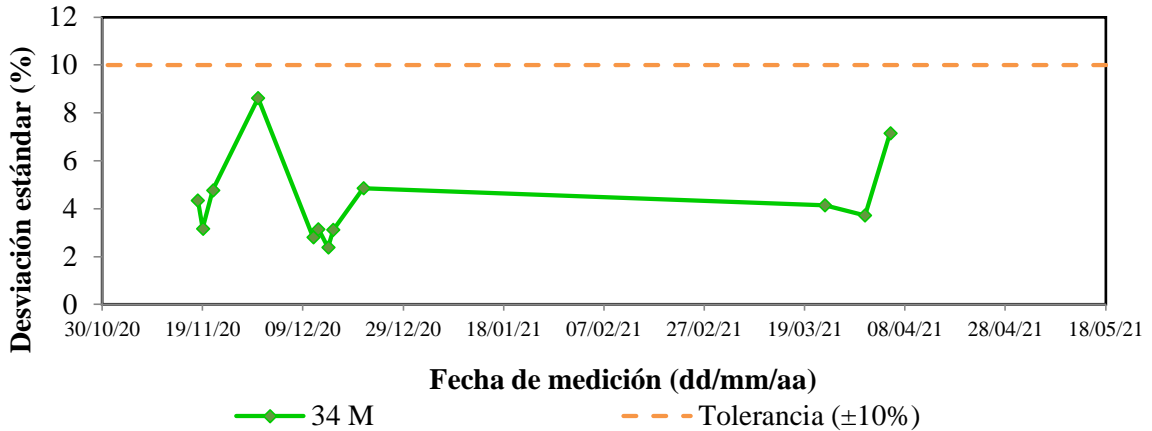


Figura 4.15 Precisión en contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies

### b. Exposición ambiental

A continuación, se presenta la desviación estándar para las medidas de exposición ambiental obtenidas con el equipo portátil 38 que corresponde al detector portátil *Inspector Radiation Alert SE International*. Se observó que las mediciones se encuentran dentro del rango establecido como tolerable, lo que garantizaría una precisión aceptable.

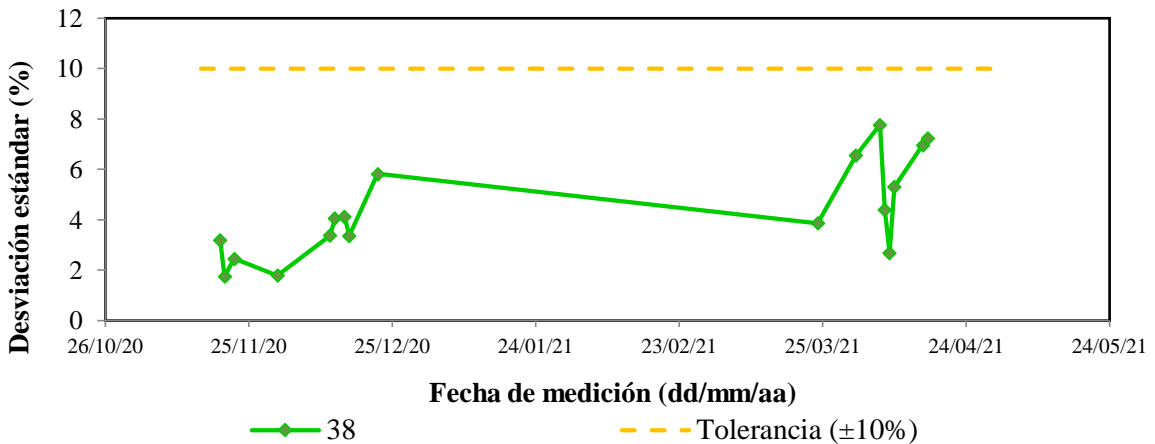


Figura 4.16 Precisión en exposición ambiental - Detector GM portátil

### c. Exposición personal

La medición de la precisión para el equipo 45, un dosímetro de lectura directa marca Ludlum modelo 25-IS-01, arrojó medidas fuera del rango de tolerancia establecido, lo que indica que el equipo no presenta una buena precisión, y resultado de esto se debe realizar verificaciones

con mayor frecuencia para evaluar su buen funcionamiento. Los resultados para el grupo de detectores se encuentran en el Anexo B.

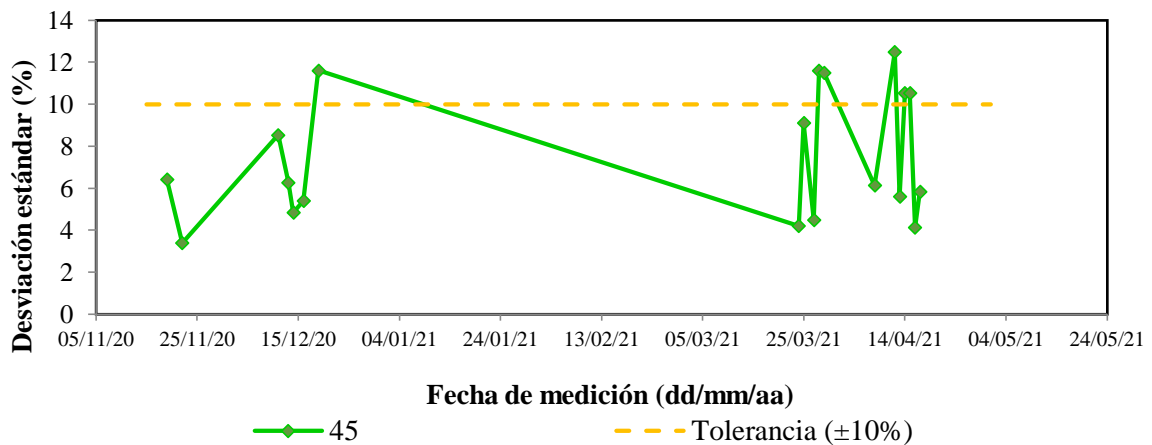


Figura 4.17 Precisión exposición personal - Dosímetro de lectura directa

Todo el grupo de detectores presentó una aleatoriedad considerable en las medidas, especialmente se presentó en las mediciones de exposición ambiental y personal, lo cual se podría explicar debido a que estas mediciones se realizaron a una distancia detector-fuente más grande que la utilizada para medir contaminación superficial, donde los resultados en precisión fueron mejores.

#### 4.3.6 Dependencia direccional

Los resultados para esta prueba se representan solamente para las magnitudes de exposición ambiental y exposición personal, en los gráficos, el eje x representa los diferentes ángulos de medición y en el eje de las ordenadas se encuentra el valor registrado por el equipo, para esta prueba se definió dos rangos de tolerancia,  $\pm 20\%$  del valor esperado (línea punteada amarilla), esto para mediciones en ángulos inferiores a  $45^\circ$ ; y  $\pm 30\%$  (línea punteada roja) para ángulos superiores a  $45^\circ$ , los resultados para el grupo restante de detectores se indican en el Anexo B.

##### a. Exposición ambiental

Para esta magnitud se analizó el comportamiento de la sonda GM número 2 marca Graetz modelo 18550C, la cual se encuentra en tolerancia para ángulos menores a  $45^\circ$ , sucede lo contrario para ángulos por encima de  $45^\circ$  donde las mediciones estuvieron por fuera de la

tolerancia definida y por tanto no se recomienda el uso de este equipo en esas posiciones angulares. El consolidado para todos los detectores se encuentra en el Anexo B.

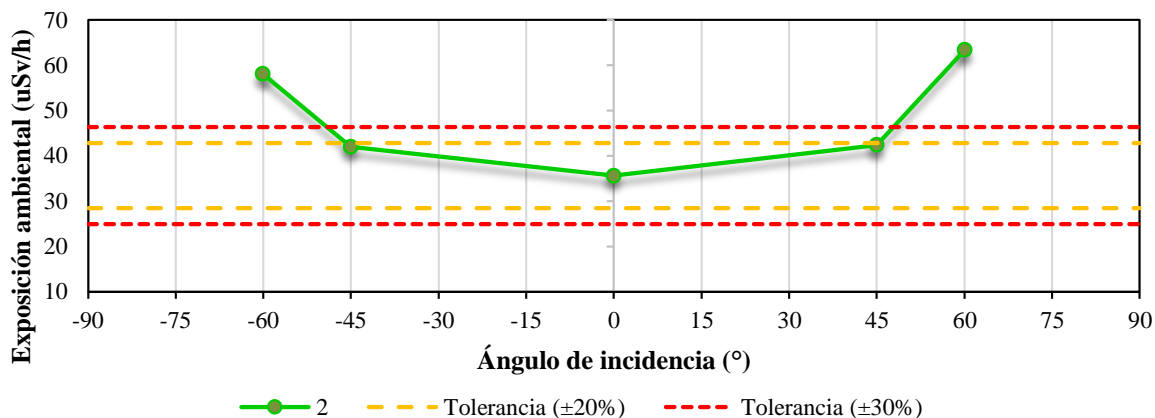


Figura 4.18 Dependencia direccional exposición ambiental - Sonda GM

### b. Exposición personal

Para esta magnitud se analizó el comportamiento del dosímetro de lectura directa 47 marca Ludlum modelo 25-IS-1, se observó que los registros para los dos rangos considerados como tolerables,  $\pm 20\%$  y  $\pm 30\%$  para ángulos inferiores a  $45^\circ$  y superiores a  $45^\circ$  respectivamente, se centraron dentro de las tolerancias definidas. Los registros para este grupo de detectores se encuentran en el Anexo B.

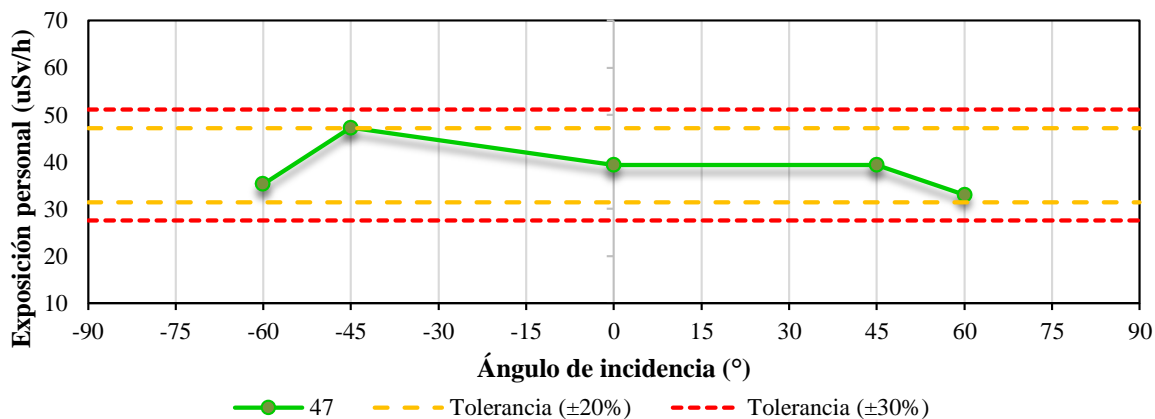


Figura 4.19 Dependencia direccional exposición personal - Dosímetro de lectura directa



#### 4.4 Pruebas inmediatas

Debido a la gran cantidad de equipos para su envío a calibración, fue necesario validar que el equipo se encuentre operando con normalidad, tanto para llevar a cabo la calibración como en la recepción del mismo, para validar su uso en los diferentes servicios, de tal manera que se pueda detectar a tiempo algún daño. Este proceso sirvió de soportes con el que se comprueba que el equipo sale de la institución en buenas condiciones. El procedimiento estructurado se encuentra en el Anexo I.

##### 4.4.1 Inspección inicial

Se identificó detectores en mal estado como el detector de radiación de manos y pies Ludlum modelo 177 con serial PR316724 el cual tenía señales de golpes (figura 4.20 a), uno de ellos con su lámina rota del sensor tipo *pancake* (figura 4.20 b), a este detector no se le realizó pruebas de verificación, solo se reportó el daño al grupo de equipos biomédicos.

En su regreso de calibración, se evidenció que el dosímetro de lectura directa marca Ludlum modelo 25-I-1 serie 25014960 tenía señales de daño en sus botones selectores y una mancha en unos pixeles de la pantalla, se realizó la anotación respectiva en la hoja registro de los equipos, luego se validó el uso en servicio ya que el equipo respondió de manera adecuada ante una fuente radiactiva.



Figura 4.20 a) Averías después de calibración detector de radiación de manos y pies marca Ludlum modelo 177, b) *pancake* rota, c) detección de fallo en mediciones antes del envío a calibración, d) desperfectos en pantalla y botones de operación para un dosímetro de lectura directa.

##### 4.4.2 Certificados de calibración

El detector GM *Inspector SE International* en su retorno de calibración llegó sin certificado para el modo contaminación radiactiva correspondiente al año 2021.

Los resultados de calibración para las sondas tipo GM modelo 18550CE no fueron los satisfactorios, en su certificado indica que fueron rechazados para la calibración ya que estos detectores no fueron reconocidos por el monitor ALMO 6, en principio se pensó dar de baja a estos detectores, pero en las pruebas de verificación se identificó que el error se debe al mal funcionamiento del monitor donde se conectan las sondas.

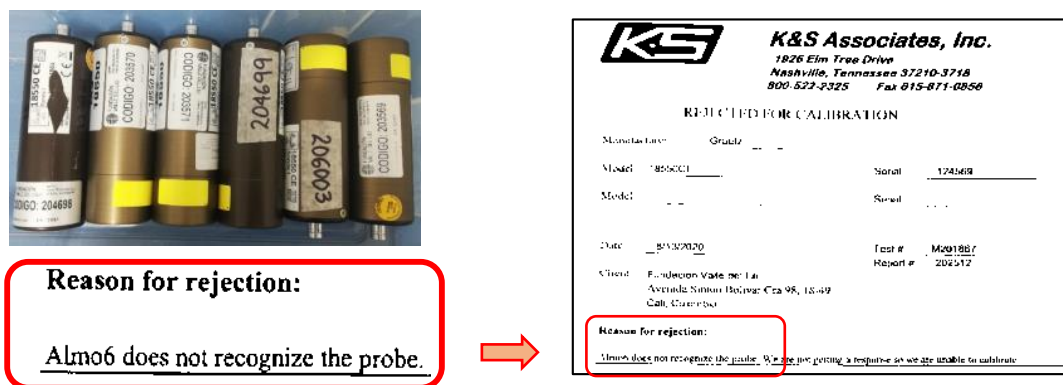


Figura 4.21 Sondas GM no funcionales en calibración

## Valores de eficiencia no OK

### 4.4.3 Constancia

A partir de esta prueba, se identificó el correcto funcionamiento de los detectores comparando la respuesta ante radiación antes de salir de la institución (línea de color naranja) y en su retorno (línea de color verde), los registros se muestran con su respectiva desviación estándar, se validó que las mediciones guarden una constancia, los resultados de esta prueba permitieron identificar el dosímetro de lectura directa con código SAP 203766, marca Ludlum, modelo 25-IS-1 con serial 25017623, el cual no detecta ninguna señal en respuesta ante una fuente radiactiva a pesar de encender (figura 4.20 c), por lo tanto, no se envió a calibración, a este dosímetro se le realizaron verificaciones donde no mostró mejoría en sus registros, posteriormente se contactó con el proveedor para evaluar su solución; el equipo no tuvo reparo, y por tanto, se decide dar de baja, este equipo no hace parte del inventario de esta familia de detectores; en su reemplazo para la calibración, se envió otro dosímetro de lectura directa con serial 25014960 del mismo modelo y marca el cual presentó una respuesta aceptable.

Los registros de esta prueba se almacenan en los formatos diseñados para cada detector, se indica el valor registrado en función del número de mediciones.

Para equipos que trabajan en diferentes modos de operación los gráficos se presentan de manera independiente, contaminación superficial (figura 4.22) donde se aprecia constancia en los resultados; y exposición radiactiva ambiental o persona (figura 4.23) los cuales muestran mejor constancia y el registro es muy cercano al inicial. Los registros restantes se encuentran en el Anexo C.

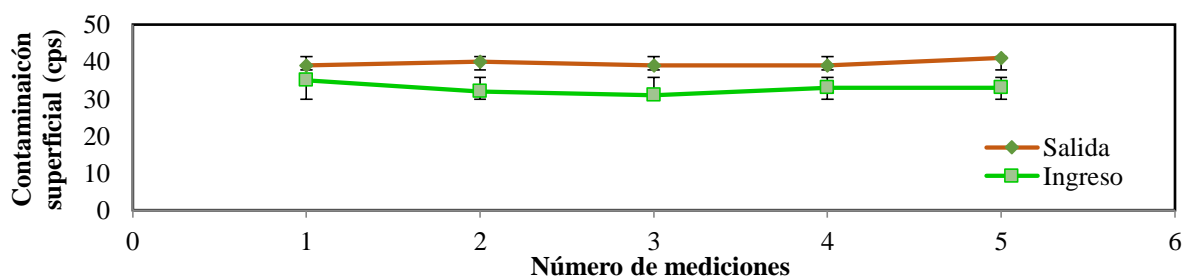


Figura 4.22 Registros contaminación superficial salida e ingreso del equipo

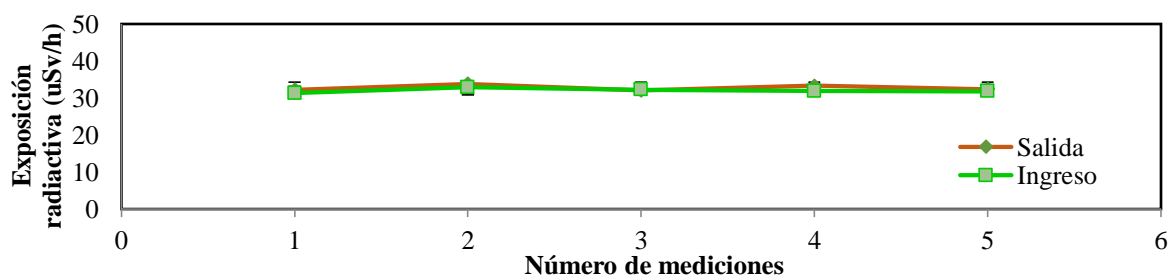


Figura 4.23 Registros exposición radiactiva salida e ingreso del equipo

#### 4.5 Extensión de intervalos de calibración

Uno de los factores más importantes en el estudio de las verificaciones es la revisión del funcionamiento de los equipos, analizando los resultados de las medidas de radiación mediante precisión, exactitud, constancia y la evaluación de certificados. Con base en los resultados anteriores, y siguiendo lineamientos de métodos, documentos y guías internacionales se pudo ampliar o extender el intervalo de calibración, garantizando el buen funcionamiento del equipo y contribuir de esta manera con la protección radiológica de los individuos y del medio ambiente.

La asignación de nuevas fechas de calibración se realizó aplicando el método 1, el cual permite evaluar la constancia en los resultados de calibraciones anteriores en función del tiempo de operación del equipo; y método 4 que estudia verificaciones periódicas entre calibraciones, y que permiten el aseguramiento del buen funcionamiento del equipo según la guía ILAC-G24 / OIML D10 [37], de esta manera se logró estimar si los periodos de calibración de los equipos se consiguen extender o no. Se tiene en cuenta la fecha de la próxima calibración para cada detector, los equipos de color rojo correspondientes a un 12% del total de equipos, son aquellos sin verificar debido a que fueron equipos que por distintas circunstancias no se tuvo acceso, el resto de equipos de color verde son los equipos a los cuales se realizó el estudio de las verificaciones correspondientes (figura 4.23), en este grupo se presentan dos casos: los equipos que se observan sobre la línea punteada azul, corresponden al 40% de los equipos a los cuales no se extiende el intervalo de calibración, ya que no cumplen con uno o dos de los métodos antes mencionados, por tanto, estos equipos tienen prioridad para ser enviados a calibración y así continuar con el respectivo proceso que permita garantizar su buen desempeño. Estos equipos siguen sujetos a verificaciones que permiten evaluar su buen funcionamiento, para validar su uso o por el contrario para que se intervengan, y se realicen las acciones correctivas respectivas (mantenimiento o calibración). El segundo caso para el restante de equipos, corresponde a un 48% a los cuales se consiguió extender el tiempo de calibración, estos demostraron estar en la capacidad de seguir desempeñado su función de manera correcta por un tiempo más prolongado que el establecido por el certificado.

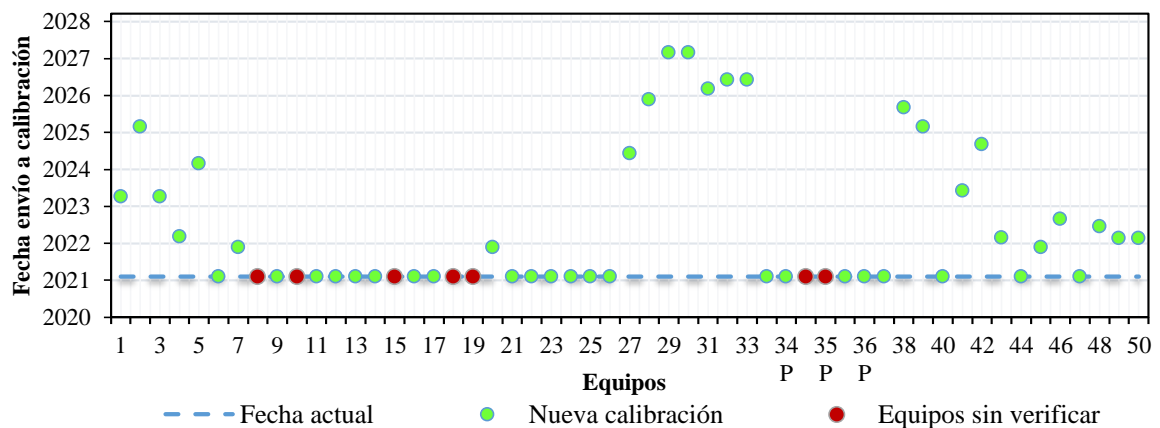


Figura 4.24 Nuevos periodos de calibración

Una proyección de la extensión de intervalos de calibración se muestra en la tabla 7,2 en ella se presenta una adaptación para un detector Geiger Müller, siguiendo el ejemplo de la capacitación impartida por el Instituto Nacional de Metrología (INM) [90].

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron, se extendió el periodo de calibración de 24 detectores, los cuales se encuentran organizados por años, el PAM permite no solo extender la frecuencia de calibración sino también reducir costos por calibraciones sucesivas y prevenir daños en los detectores durante este proceso (Anexo F)

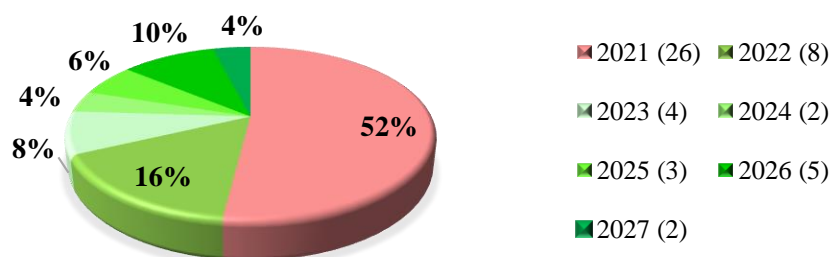


Figura 4.25 Extensión de intervalos de calibración por años

La prolongación de las fechas de calibración genera una reducción significativa en los costos destinados a las calibraciones de los equipos, teniendo como referencia los costos establecidos por el área de metrología de la FVL que estima los costos anuales por calibración en un laboratorio nacional e internacional para los equipos en estudio (tabla 4,7 y 4,8), otra consideración importante es que a la hora de enviar los equipos a calibrar estos deben salir de la institución y existe una probabilidad de que sufran daños durante este proceso que se traduzcan en costos para la institución, como los presentados en la tabla 4.9.

# Capítulo 5

## Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

Durante la realización de esta investigación se analizaron datos y confrontaron resultados, a partir de los cuales se llegaron a las siguientes conclusiones:

Mediante el programa de aseguramiento metrológico establecido, se optimiza los procesos de confirmación metrológica para los DRI gaseosos tipo GM, asegurando a través de las verificaciones periódicas, qué equipos operan adecuadamente y ante un eventual fallo se pueda tomar acciones correctivas oportunas, dando un valor agregado en la protección radiológica de la institución.

Se identificaron 50 DRI con sus características más relevantes los cuales se recopilan en el inventario, esto se logró mediante la revisión de documentos como manuales de operación y cartillas de presentación de los detectores, junto a documentos nacionales e internacionales como la normativa ILAC G24 OIL D10 adoptada por el Instituto Nacional de Salud (INS) para el aseguramiento metrológico de equipos de laboratorio, y las Guías de buenas prácticas No. 14 y 30 del laboratorio nacional de física (National Physical Laboratory -NPL) del Reino Unido [12], [13], entre otros.

El análisis de la información recopilada en la verificación de los DRI y la combinación de los resultados (método 1 y 4), permitió soportar y fortalecer la decisión de extensión de los intervalos de calibración, asegurando el buen desempeño mediante las revisiones frecuentes que se definieron para cada detector siguiendo y adaptando recomendaciones nacionales e internacionales.

El programa de aseguramiento metrológico se encuentra estructurado en instructivos que permiten desarrollar paso a paso las pruebas de verificación, y formatos de registro con acceso mediante códigos QR para almacenar los datos eficientemente, los cuales son la evidencia del desempeño adecuado de los detectores.

Se evaluó el 90% de los detectores de radiación ionizante en estudio, el análisis de los resultados permitió extender los intervalos de calibración para un 48% de estos equipos, esto

evidenció que al no efectuarse la calibración, no se puede considerar que un equipo sujeto a un programa de aseguramiento metrológico no sea confiable ni apto para el uso en los diferentes servicios, ya que se consideró el comportamiento de estos equipos durante la calibración en anteriores años junto a los resultados de las verificaciones rutinarias, en los cuales se pueda identificar que no existen cambios relevantes en su desempeño técnico.

En esta investigación se comparó la teoría aplicada al cálculo de tasa de exposición para una fuente puntual y para una fuente con geometría cilíndrica, la diferencia entre las estimaciones fue de 5.24 uSv/h equivalente a un 10.74% (tabla 7.1) a una distancia de (10 cm), los resultados evidencian la importancia de la geometría en la estimación de la dosis ya que la diferencia aumenta significativamente al reducir la distancia entre fuente y detector.

## 5.2 Recomendaciones

Una de las limitantes para realizar la prueba de exactitud en contaminación superficial, fue la falta de fuentes radiactivas para evaluar la respuesta de los detectores en diferentes rangos de energía, por tanto, se recomienda la adquisición de las siguientes fuentes:

Tabla 5.1 Fuentes patrón planas para contaminación superficial [4]

Isótopo	Modelo	Vida media [años]	Actividad [kBq]	Energía [keV]
C-14	LDS-014-100	5730	3,7 kBq	156
Cl-36	LDS-036-100	3,01 x 10 <sup>5</sup>	3,7 kBq	709
Sr-90/Y-90	LDS-090-100	28,15	3,7 kBq	2274

Los certificados de las fuentes deben presentar la tasa de emisión superficial  $\beta$  en  $2\pi$  [s<sup>-1</sup>]

## 5.3 Trabajo futuro

Uno de los enfoques que surgen a partir de este trabajo de grado, es extender la metodología utilizada y aplicarla a otros detectores, logrando así una mayor cobertura en el aseguramiento metrológico, esto se puede implementar como parte de los controles de calidad que se



realizan con frecuencia en la FVL para los equipos usados en zonas de trabajo con radiación ionizante.

En cuanto a investigación, se puede establecer los valores de referencia para exposición radiactiva y contaminación superficial ante diferentes fuentes radiactivas, para instrumentos del mismo tipo.

# Bibliografía

- [1] EANM, Best Practice in Nuclear Medicine. Part 2. A Technologist's Guide., A Technol. Guid. - Part 2, pp. 1–48, 2007.
- [2] International Atomic Energy Agency - IAEA, La radiación es parte esencial de nuestra vida, 2013. [Online]. Available: <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/Patients/information-public/index.htm#PUB-FAQ01>. [Accessed: 20-Jun-2020].
- [3] Diana Patricia Jara Contreras, U. C. de C., Equipos biomédicos generadores de radiaciones ionizantes, p. 34, 2018.
- [4] Safety reports series N° 16 - Calibration of Radiation Monitoring Instruments, 2018.
- [5] Schuler, C., G. Butterweck, and C. Wernli, Calibration and Verification of Surface Contamination Meters-Procedures and Techniques, no. 07. 2007.
- [6] Lesson 5: Surface contamination measurement.
- [7] Ministerio de salud y protección social, Resolucion Numero 0000482 De 2018. p. 46, 2018.
- [8] Tulio, A., H. Rivero, P. O. Verdecia, R. Agustín, S. Águila, and Y. Moreno, Aseguramiento metrológico en la producción y uso de radiofármacos and application of radiopharmaceutical, pp. 20–24, 2012.
- [9] Italiana, N., Portable, transportable or installed X or gamma radiation ratemeters for environmental monitoring - CEI 45-49. Italia, 1997, p. 29.
- [10] Régio Brambilla, C. and G. Hoff, Impact evaluation of the geometry on measurements of solid radioactive waste exposure rates in nuclear medicine, vol. 30, no. 4, pp. 330–340, 2014.
- [11] Barbosa, N., L. Sandoval, J. S. Quimbayo, X. Cely, and Á. Londoño, Routine constancy tests of Geiger-Müller detectors in nuclear medicine and radiopharmacy—Instituto Nacional de Cancerología: A quality assurance proposal for radiation protection equipment, p. 8, 2020.
- [12] (Nuvia), C. J. L. and P. H. B., Good Practice Guide No. 14 Issue 2 - The Examination, Testing and Calibration of Portable Radiation Protection Instruments, Assessment, no. 14, pp. 1–79, 1992.
- [13] Raghavan, S. V., Good Practice Guide No. 30 Practical Radiation Monitoring, CSI Trans. ICT, vol. 1, no. 2, p. 77, 2013.
- [14] CNSC and CCSN, Radiation Protection Radiation Protection REGDOC-2.7.1 Consultation version, 2019.
- [15] Eckert & Ziegler Strahlen- und Medizintechnik AG: Active area: 100mm x 100mm.

- [Online]. Available: [https://www.ezag.com/home/products/isotope\\_products/isotrak\\_calibration\\_sources/reference\\_sources/wide\\_area\\_sources/active\\_area\\_100mm\\_x\\_100mm/](https://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/reference_sources/wide_area_sources/active_area_100mm_x_100mm/). [Accessed: 02-Mar-2021].
- [16] Library, T. and L. Philosophers, Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics (1949), Niels Bohr Collect. Work., vol. 7, no. C, pp. 339–381, 1996.
- [17] Pollyceno, L. S. and A. D. Ribeiro, Wave-particle duality using the Compton effect, Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys., vol. 384, no. 31, p. 126808, 2020.
- [18] Martin, J. E., W. Verlag GmbH, and C. KGaA, Physics for Radiation Protection WILEY.
- [19] Planas, O., Energía nuclear, 8 de marzo de 2019, 2019. [Online]. Available: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/radioactividad/particula-beta>.
- [20] Amaro, J. E. and Universidad de Granada, Dosimetría y Protección Radiológica, pp. 1–37, 2007.
- [21] Bevelacqua, J. J., Contemporary Health Physics: Problems and Solutions: Second Edition. Wiley-VCH, 2009.
- [22] ¿Qué es el detector de ionización gaseosa? Detector lleno de gas: definición. [Online]. Available: <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-detector-de-ionizacion-gaseosa-detector-lleno-de-gas-definicion/>. [Accessed: 05-May-2021].
- [23] D. Dance, S. Christofides, M. Maidment, I. M., Diagnostic Radiology Physics: A handbook for teachers and students, Iaea, p. 710, 2014.
- [24] Van Eijk, C. W. E., Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students. IAEA International Atomic Energy Agency, 2015.
- [25] CSN, Tema 6: Detección Y Dosimetria De La Radiación, p. 19, 2009.
- [26] Seco, J., B. Clasié, and M. Partridge, Review on the characteristics of radiation detectors for dosimetry and imaging, Phys. Med. Biol., vol. 59, no. 20, pp. R303–R347, 2014.
- [27] PTW Freiburg, Ionizing radiation detectors: Including Codes of Practice, p. 100, 2013.
- [28] Dosimetry, R., Qué es el contador proporcional - Detector proporcional - Definición, 2021, 2021. [Online]. Available: <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-contador-proporcional-detector-proporcional-definicion/>. [Accessed: 09-Feb-2021].
- [29] Knoll, G. F., Radiation Detection and Measurement, 3rd ed - (Wiley, 2000).pdf. 2000.
- [30] Brosed, A., Volumen 1: Medida de la radiación Fundamentos de Física Médica. 2011.
- [31] Publicación 103 Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica.

- [32] Boliviana San Pablo, U. C., Uso consciente de la radiación - Podcast, 2020.
- [33] De La Ubeda C., C., D. Nocetti G., A. Inzulza C., C. Oyarzún C., and R. Alarcón E., Quantities and units for dosimetry of occupationally exposed personnel in diagnostic and interventional radiology, *Revista Chilena de Radiología*, vol. 24, no. 1. Sociedad Chilena de Radiología, pp. 5–11, 01-Mar-2018.
- [34] Energia, M. D. E. M. Y., Resolución 18-1434 de 2002, vol. 2002, no. 45, p. 96, 2002.
- [35] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación and N. (ICONTEC), Sistema De Gestion De La Medicion. Ntc-Iso10012, 2003-26-06, p. 22, 2003.
- [36] Norma técnica NTC-ISO/IEC Colombiana 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración e: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005.
- [37] ILAC-G24 OIML D 10, Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments, Silverwater NSW 2128, 2007.
- [38] Forero, J. C., Aseguramiento Metrológico de los Equipos de Laboratorio, pp. 1–27, 2016.
- [39] Angie Paola Rodríguez Guerrero, Aseguramiento metrológico equipos de laboratorio. 25/9/2015, Bogotá, p. 32, 2015.
- [40] Aranda, V., Confirmación Metrológica Proceso en Laboratorios e Industria - La Guía MetAs, III Congr. Iberoam. Lab., no. May, pp. 1–18, 2005.
- [41] Sistemas de gestión de la medición. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición - NTC-ISO 10012, 2003.
- [42] Aguiar, J. C., An analytical calculation of the peak efficiency for cylindrical sources perpendicular to the detector axis in gamma-ray spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 66, no. 8, pp. 1123–1127, 2008.
- [43] Cardona, Ospina, J. F., Aseguramiento Metrológico Facultad De Medicina, p. 20, 2016.
- [44] Schuler, C., G. Butterweck, and C. Wernli, Calibration and Verification of Surface Contamination Meters-Procedures and Techniques, 2007.
- [45] Italiana, N. and D. Pubblicazione, Strumentazione per la radioprotezione-Apparecchi portatili di misura e sorveglianza della contaminazione fotonica Title Radiation protection instrumentation-Portable photon contamination meters and monitors - CEI EN 62363, 2011.
- [46] Kodama, Y., F. F. Suzuki, M. P. Sanches, and D. L. Rodrigues., Discussion on Surface Contamination Monitoring Using Portable Zinc Sulfide, *Inst. Pesqui. Energéticas e Nucl. - IPEN-CNEN/SP*, p. 4, 2000.
- [47] Calibration of Survey Meters and Measurements of Contamination, pp. 11–13, 2011.

- [48] Stabin, M. G., *Radiation protection and dosimetry*. Springer, 2007.
- [49] Smith, D. S. and M. G. Stabin, Exposure rate constants and lead shielding values for over 1,100 radionuclides, *Health Phys.*, vol. 102, no. 3, pp. 271–291, Mar. 2012.
- [50] Bevelacqua, J. J., *Health Physics in 21st Century Atoms, Radiation, and Nuclear and Radiochemistry Magnetism in Medicine Physics for Radiation Protection Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. 2009.
- [51] Taylor, B. N. and C. E. Kuyatt, *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, 1994.
- [52] VIM, *VIM Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados BIPM Oficina internacional de pesas y medidas iec comisión electrotécnica internacional ifcc federación internacional de química clínica y laboratorios M*.
- [53] *Measurement and uncertainty content - Introduction Measurements*.
- [54] Minniti, R., L. Pibida, M. O’Brien, and M. Unterweger, Measurement of the Response of Radiation Detector Instruments at the NIST, pp. 1–6, 2005.
- [55] Bjerke, H. *et al.*, Radiation survey meters used for environmental monitoring, no. January. 2012.
- [56] Pibida, L., R. Minniti, M. O’Brien, and M. Unterweger, Test of radiation detectors used in homeland security applications, *Health Phys.*, vol. 88, no. 5 SUPPL., pp. 84–90, 2005.
- [57] Minniti, R. and S. M. Seltzer, Calibration of a  $^{137}\text{Cs}$  g-ray beam irradiator using large size chambers, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 65, pp. 401–406, 2007.
- [58] Stanković, K. D., M. L. Vujisić, and L. D. Delić, Influence of tube volume on measurement uncertainty of GM counters, *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, vol. 25, no. 1, pp. 46–50, 2010.
- [59] Nucleares, I. A. N. and N. De Cancerología, Routine constancy tests of Geiger-Müller detectors in nuclear medicine and radiopharmacy—Instituto Nacional de Cancerología: A quality assurance proposal for radiation protection equipment, 2020.
- [60] Bevelacqua, J. J., Apéndice II: Geometrías básicas de origen y relaciones de atenuación, in *Contemporary Health Physics*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, pp. 565–571.
- [61] Soriano, B., V. Aranda, and N. Gutiérrez, Determinación de intervalos de calibración, 2004.
- [62] Shirakawa, Y., H. Nakamura, T. Kamata, and K. Watai, A fast response radiation detector based on a response prediction method for decontamination, *Radiat. Meas.*, vol. 49, no. 1, pp. 115–119, 2013.
- [63] Pibida, L., R. Minniti, M. O’Brien, and M. Unterweger, Test of radiation detectors

- used in homeland security applications, *Health Phys.*, vol. 88, no. 5 SUPPL., 2005.
- [64] Sukara, S. and S. Rimjeam, Simulation of Gamma Rays Attenuation Through Matters Using the Monte Carlo Program, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 901, no. 1, 2017.
- [65] Khairuzzaman, M. Q., Aseguramiento metrologico de equipos de laboratorios, vol. 4, no. 1, pp. 64–75, 2016.
- [66] MED, Almo 6 - Operating manual. Dresden, 2014.
- [67] Primalert Monitor de Area (FLUKE) FLUKE 05-443.pdf. .
- [68] Inc, L. measurements, LUDLUM model 177 alarm ratemeter, no. 322945, 2018.
- [69] Asm-, T., S. Advanced, S. Meter, F. Biomedical, and I. Data, ASM-990 Series Advanced Survey Meter, pp. 1–7, 2006.
- [70] Inc, L. measurements, LUDLUM model 25-IS & model 25-IS-1 Intrinsically safe personal radiation monitor user's manual, no. 25000100, 2013.
- [71] Núñez Margarita, Control de calidad de los sistemas de detección usados en Medicina Nuclear, Esc. Univ. Tecnol. Médica UdelaR, Montevideo, Uruguay Com. Tecnólogos ALASBIMN, no. 3, 2008.
- [72] IAEA, Quality Control Procedures Applied to Nuclear Instruments, Iaea-Tecdoc-1599, no. September, p. 69, 2008.
- [73] Kržanović, N., K. Stanković, M. Živanović, M. Đaletić, and O. Ciraj-Bjelac, Development and testing of a low cost radiation protection instrument based on an energy compensated Geiger-Müller tube, *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 164, no. November 2018, 2019.
- [74] Nuclear Data – Table – Laboratoire National Henri Becquerel. [Online]. Available: <http://www.lnhb.fr/nuclear-data/nuclear-data-table/>. [Accessed: 12-Mar-2021].
- [75] 8769-2, I. S., INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION, Reference Sources for the Calibration of Surface Contamination Monitors — Electrons of Energy Less than 0.15 MeV and Photons of Energy Less than 1.5 MeV. .
- [76] Low, A., A. Reasonably, P. Atenuaci, and D. Epi, ELEMENTOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA 2 . ¿ Qué nivel de atenuación ofrecen los EPI para protección radiológica ? 3 . ¿ Qué normativas son aplicables a las prendas de protección radiológica ? 4 . ¿ Según la normativa , cuál es la ce, pp. 89–92, 1996.
- [77] Organismo Internacional de Energía Atómica, Clasificación de las fuentes radiactivas Guía de seguridad, Normas Segur. del OIEA, vol. No. RS-G-1, p. 7,27, 2009.
- [78] Goyena, R. and A. . Fallis, Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, vol. 53, no. 9. 1997.

- [79] Lección 2 Principios básicos de monitorización del lugar de trabajo-PARTE 2.
- [80] QR Codes | Infographics | Google Developers. [Online]. Available: [https://developers.google.com/chart/infographics/docs/qr\\_codes](https://developers.google.com/chart/infographics/docs/qr_codes). [Accessed: 28-Apr-2021].
- [81] IAEA-TECDOC-602/S, Control de calidad de los instrumentos de medicina nuclear, p. 2, 1991.
- [82] Broga, D., Responding to a Radiological or Nuclear Terrorism Incident: A Guide for Decision Makers, vol. 38, no. 10. 2011.
- [83] CNSC, Radionuclide Information Booklet, no. April. 2018.
- [84] Eckert & Ziegler Reference & Calibration Sources.
- [85] Miguel Alcaraz, Interacción De La Radiacion Con La Materia, Ir-Sp-Ba-Tx-T02, pp. 1–13, 2013.
- [86] Miguel Alcaraz Baños, Interacción De La Radiación Con La Materia Viva, pp. 1–10, 2010.
- [87] Químicas: El Cesio. [Online]. Available: <https://www.quimicas.net/2015/07/el-cesio.html>. [Accessed: 17-Feb-2021].
- [88] NIST: X-Ray Mass Attenuation Coefficients - Cesium. [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z55.html>. [Accessed: 17-Feb-2021].
- [89] Fuerza Aérea Colombiana, Manual del plan de aseguramiento metrológico biomédico de la dirección de sanidad fuerza aérea Colombiana (MAMEB) - Manual FAC-12.4-o público, Primera. 2017.
- [90] INM, I. N. de M., Selección Intervalos de Calibración, 2020. [Online]. Available: <https://youtu.be/GhMLdSkunqc>.

## Anexos

### A. Inventario de detectores de radiación gaseosos

Número detector	Tipo de instrumento	Marca	Modelo	Modo de Operación	Rango de detección	Rango de energía (MeV)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad relativa (%)
1 - 17	Detector de radiación GM - Sonda	Graetz	18550C	H*(10)	0,001 - 20 mSv/h	0,04 - 1,30	0 a 50	0 a 96
18		Graetz	18529CE	H*(10)	0,5 - 10000 mSv/h	0,07 - 1,30	0 a 50	0 a 96
19		Graetz	18509CE	H*(10)	0.050 - 1000 mSv/h	0,05- 1,30	0 a 50	0 a 96
20 - 25		Graetz	18550CE	H*(10)	0.010 - 20 mSv/h	0,04 - 1,30	0 a 50	0 a 96
26	Primalert 10	Victoreen	Primalert 10	H*(10)	0.010 - 0,32 mSv/h	0,06 - 2,00	-20 a 52	max 90%
27 - 33	Primalert monitor de área	Fluke	05-443	H*(10)	0.001 - 10 mSv/h	0,05 - 1,30	-20 a 53	max 90%
34M, 34P	Monitor de Radiación de M&P	Ludlum	177	S <sub>A</sub> (H'(0,07))	0.010 - 1000 mSv/h 0 - 500 kcpm	0,05 - 1,30	-15 a 50	<95%
35M, 35P			177-61				-15 a 50	
36M, 36P			3276				-20 a 50	
37	Monitor de Radiación de M&P	Tema Sinergie	CMS60D	S <sub>A</sub> (H'(0,07))	0 - 50000 cps	0,05 - 1,30	-5 a 51	<90%
38	Inspector Radiation Alert	SE International	7317	H*(10) S <sub>A</sub> (H'(0,07))	0,00001 - 1 mSv/h 0 - 5000 cps	0,04 - 1,30	- 10° a 60	0 a 95
39	Contador de Radiación Geiger-Müller	Fluke-Victoreen	990S	H*(10) S <sub>A</sub> (H'(0,07))	0,00001 - 10 mSv/h 1 - 5000000 cpm	0,04 - 1,30	-10 a 50	0 a 95
40			993S					
41 - 44			993					
45 - 50	Dosímetro de lectura directa	Ludlum	25-IS-1	Hp(10)	0.02 - 2000 mSv/h	0,03 - 3,30	-40 a 65	<95%



## B. Verificaciones rutinarias

### a. Constancia

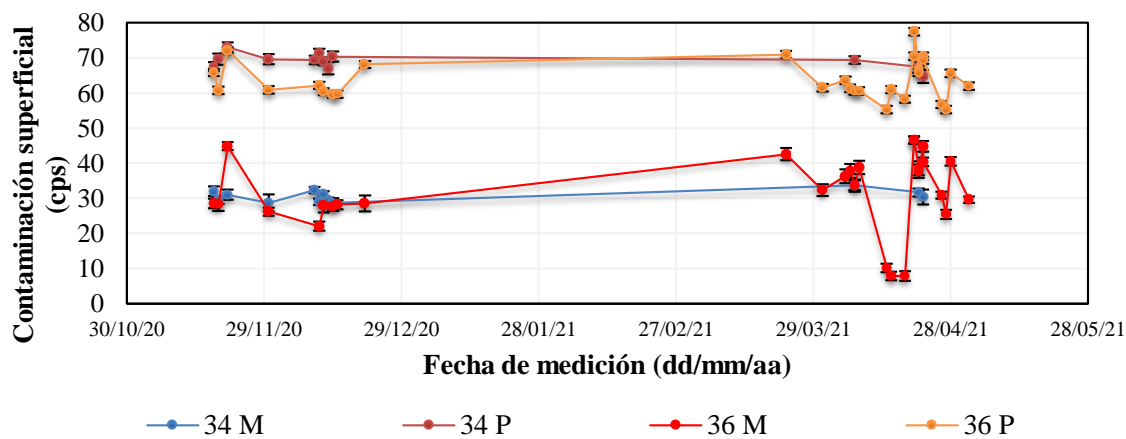


Figura 7.1 Constancia contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies

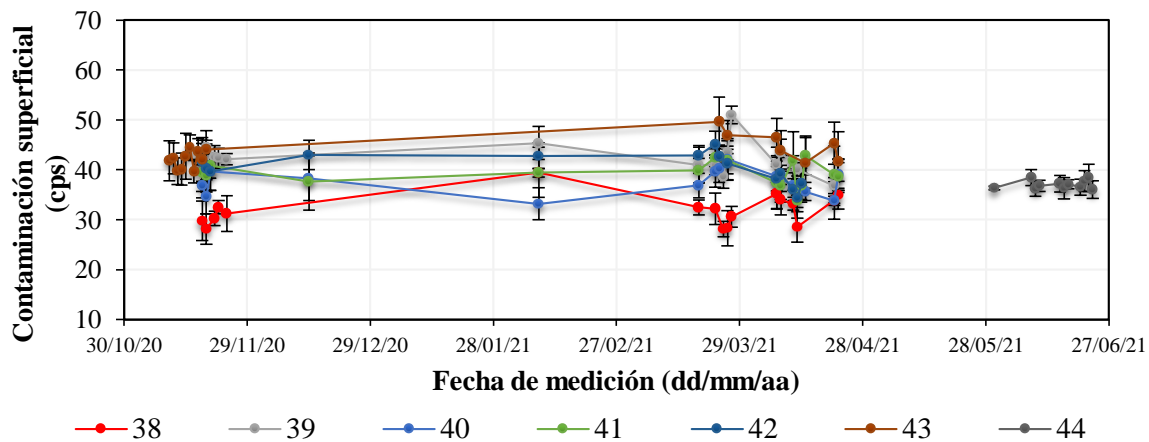


Figura 7.2 Constancia contaminación superficial - Detector GM portátil

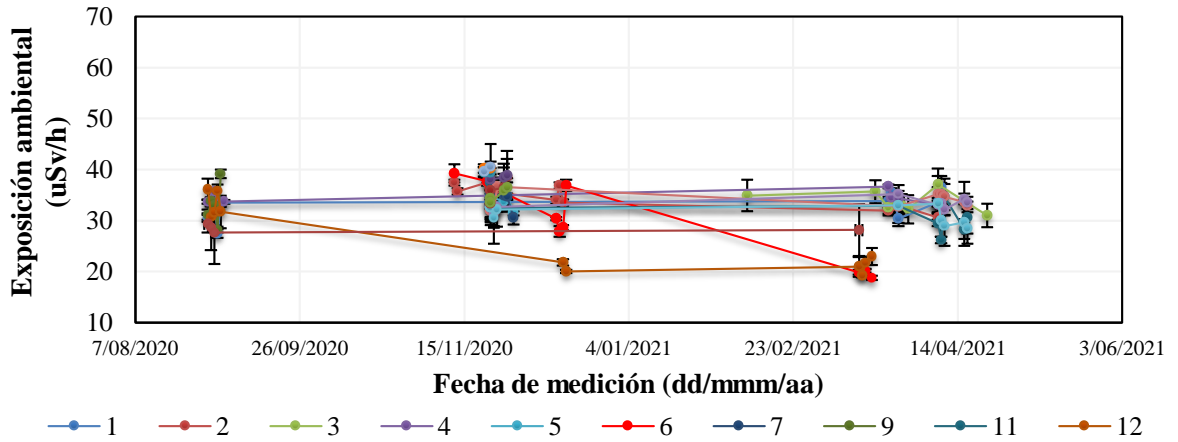


Figura 7.3 Constancia exposición ambiental - Sonda GM

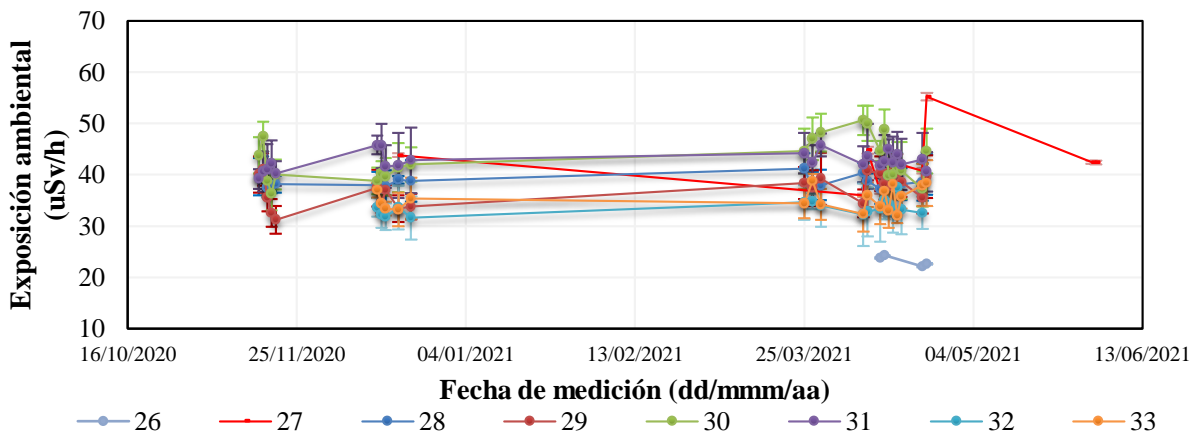


Figura 7.4 Constancia exposición ambiental - Monitor de área

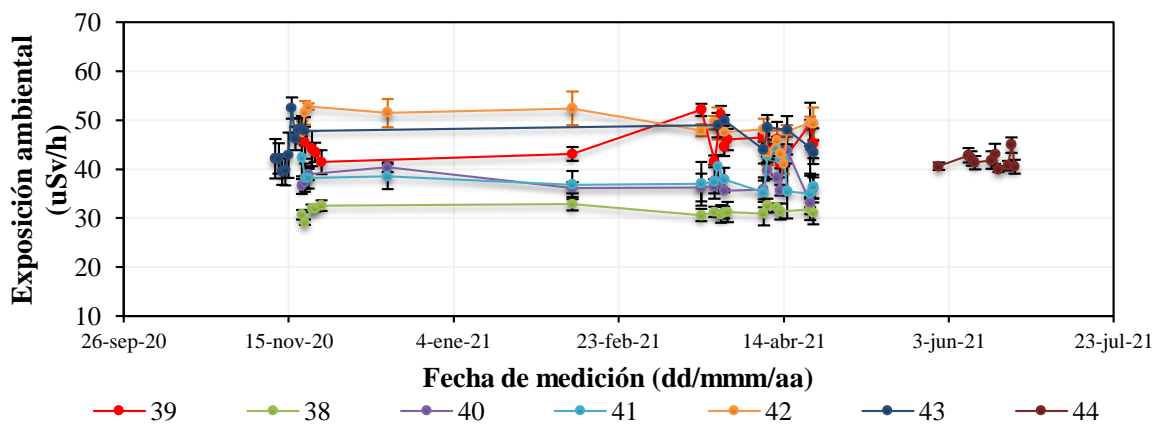


Figura 7.5 Constancia exposición ambiental - Detector GM portátil

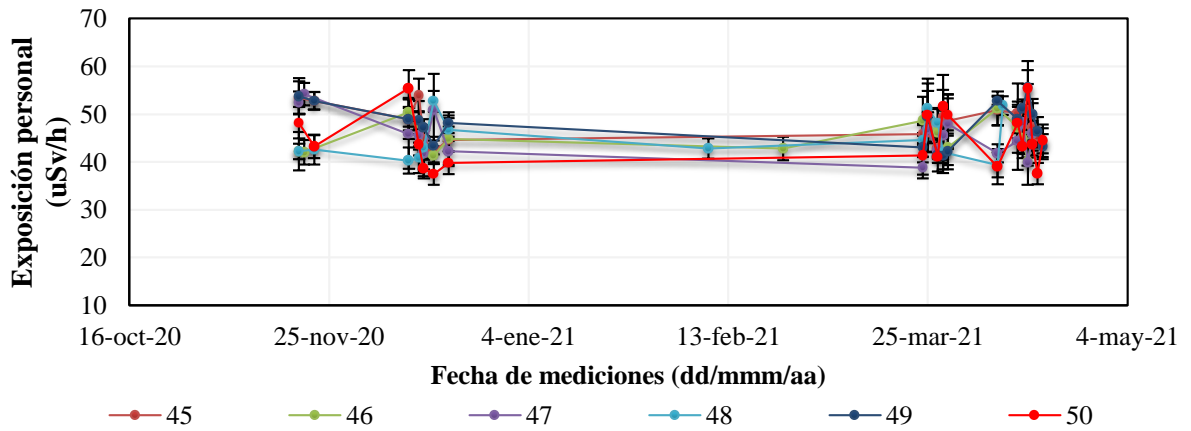


Figura 7.6 Constancia exposición personal - Dosímetro de lectura directa

**b. Exactitud**

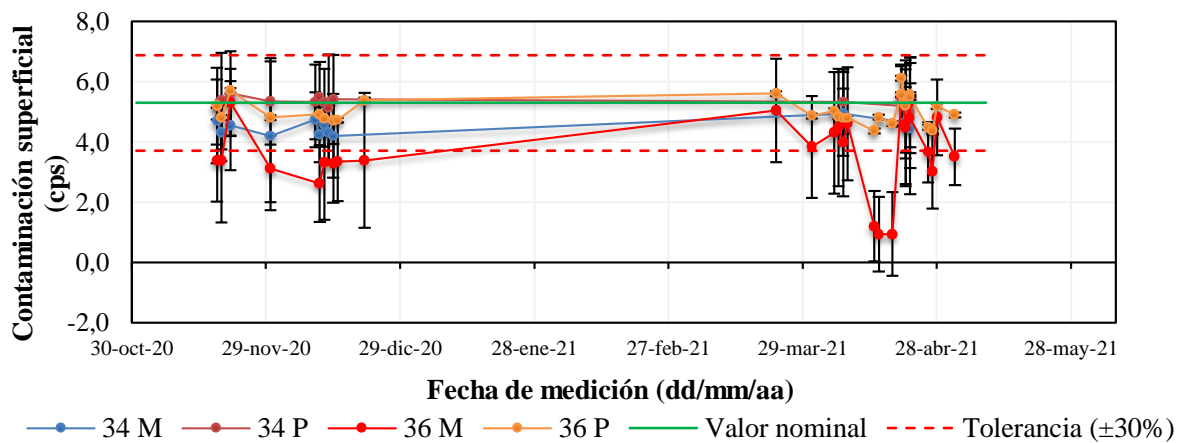


Figura 7.7 Exactitud contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies

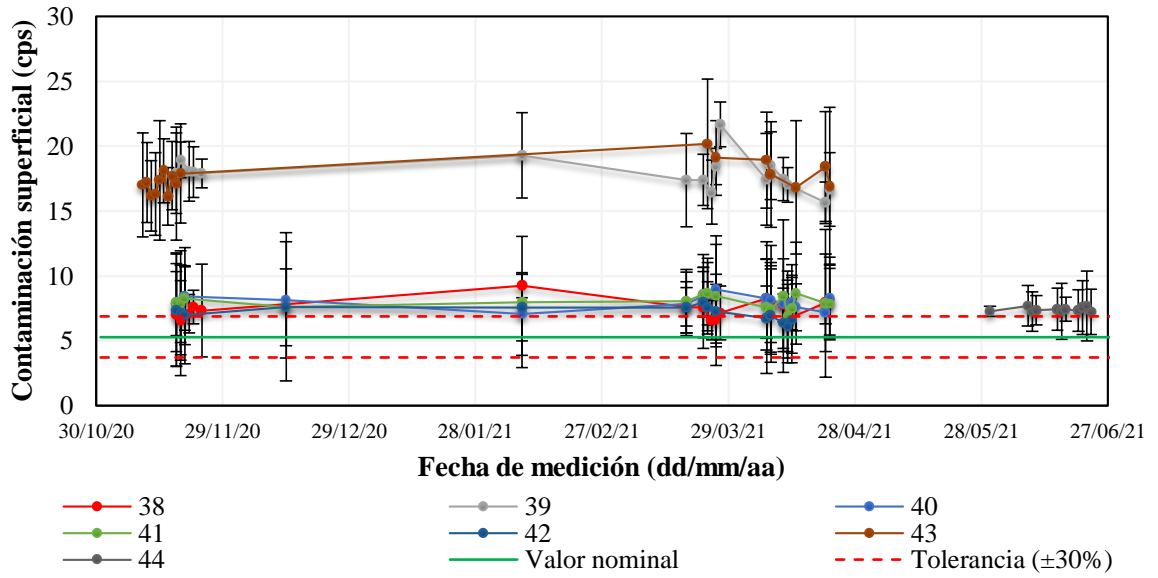


Figura 7.8 Exactitud contaminación superficial - Detector GM portátil

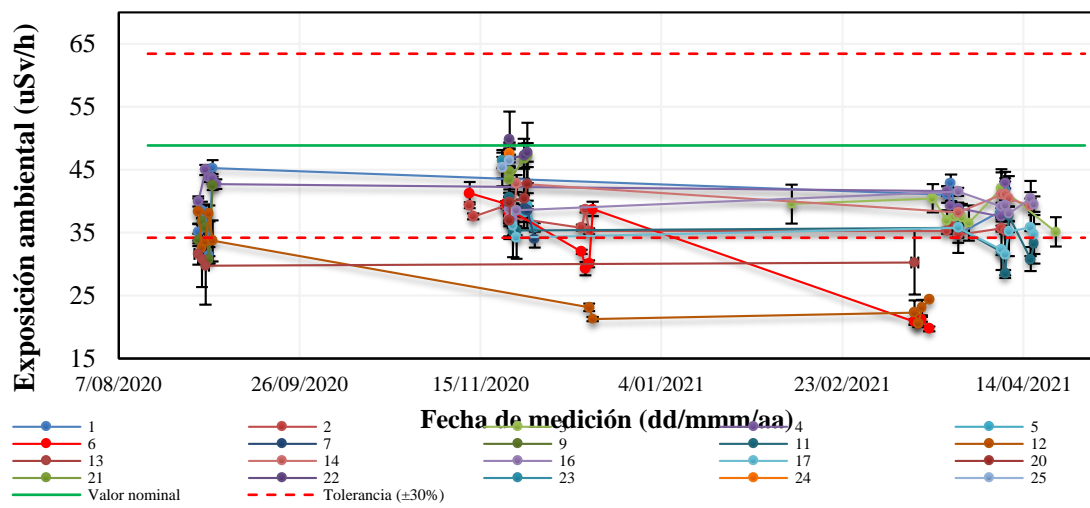


Figura 7.9 Exactitud exposición ambiental - Sonda GM

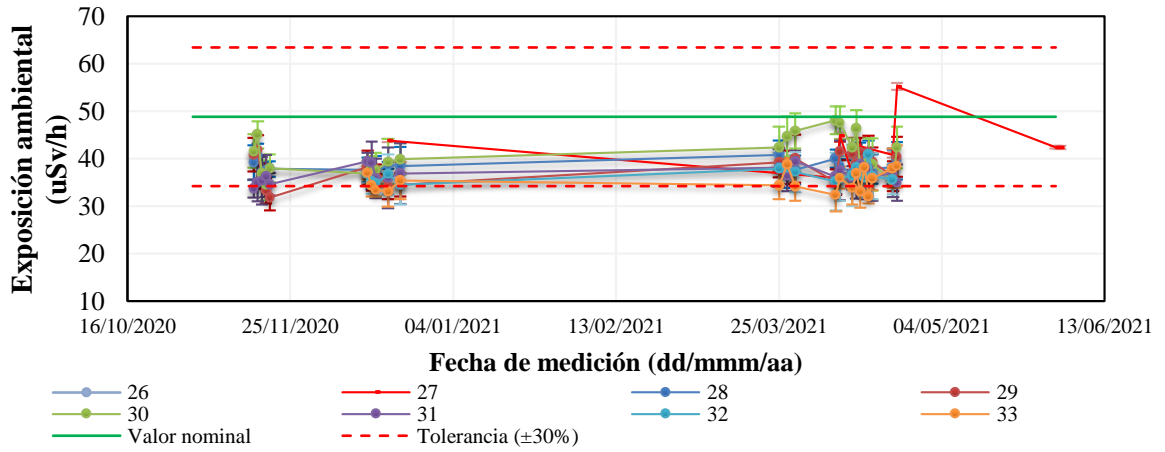


Figura 7.10 Exactitud exposición ambiental - Monitor de área

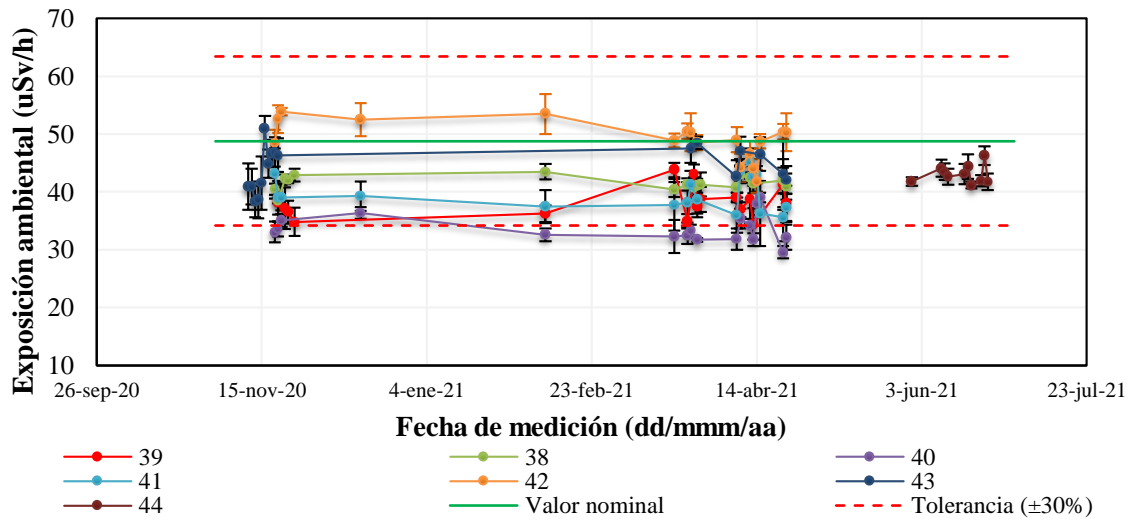


Figura 7.11 Exactitud exposición ambiental - Detector GM portátil

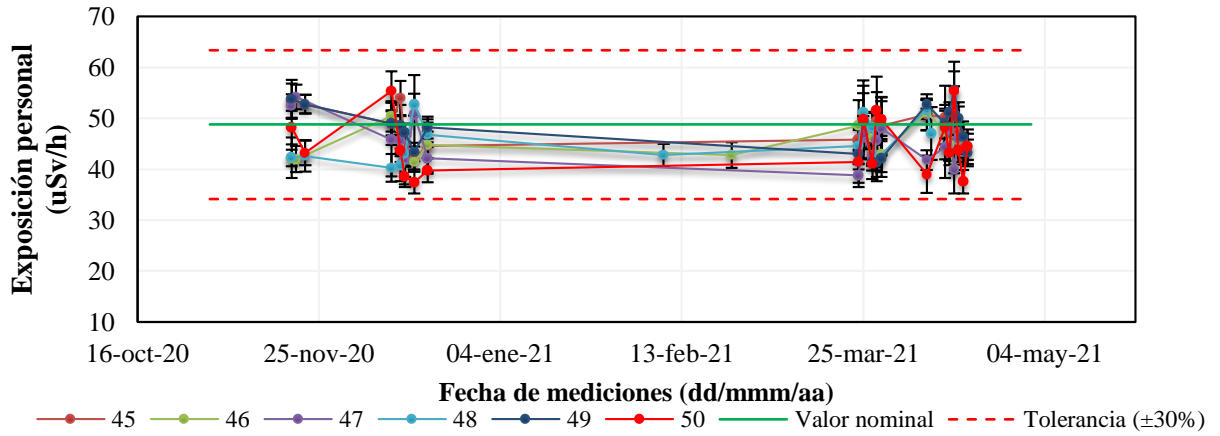


Figura 7.12 Exactitud exposición personal - Dosímetro de lectura directa

### c. Precisión

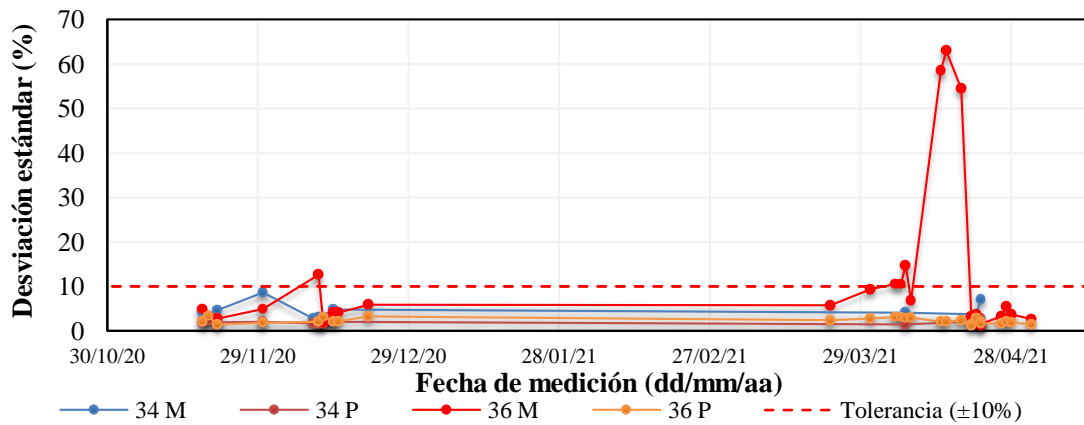


Figura 7.13 Precisión contaminación superficial - Detector de radiación de manos y pies

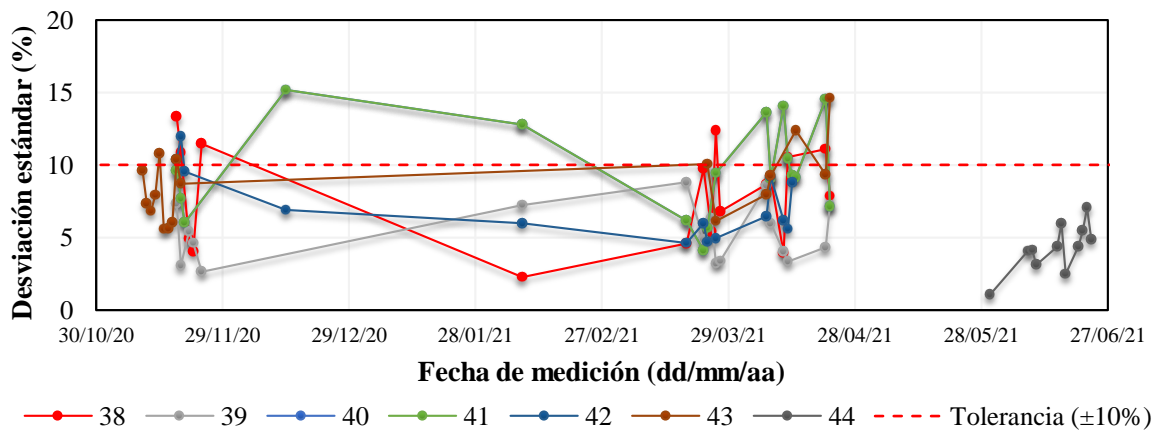
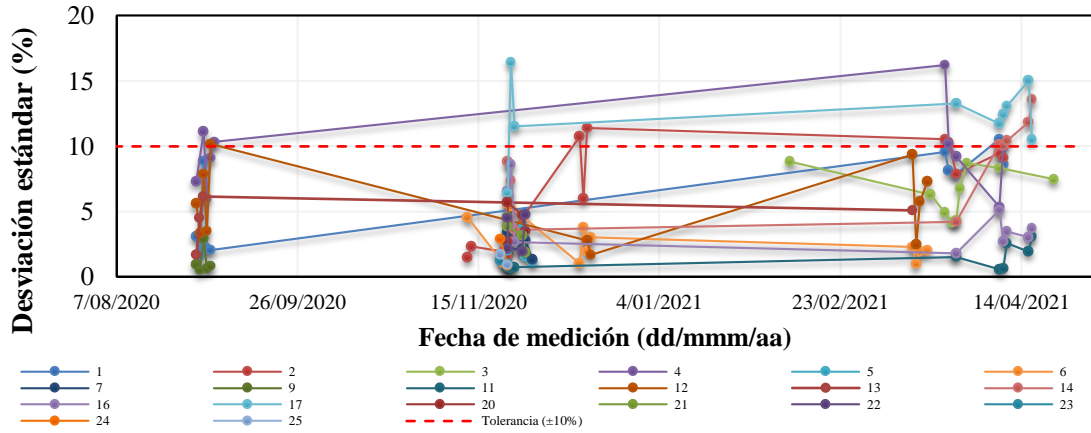


Figura 7.14 Precisión contaminación superficial - Detector GM portátil



Gráfica 7.1 Precisión exposición ambiental - Sonda GM

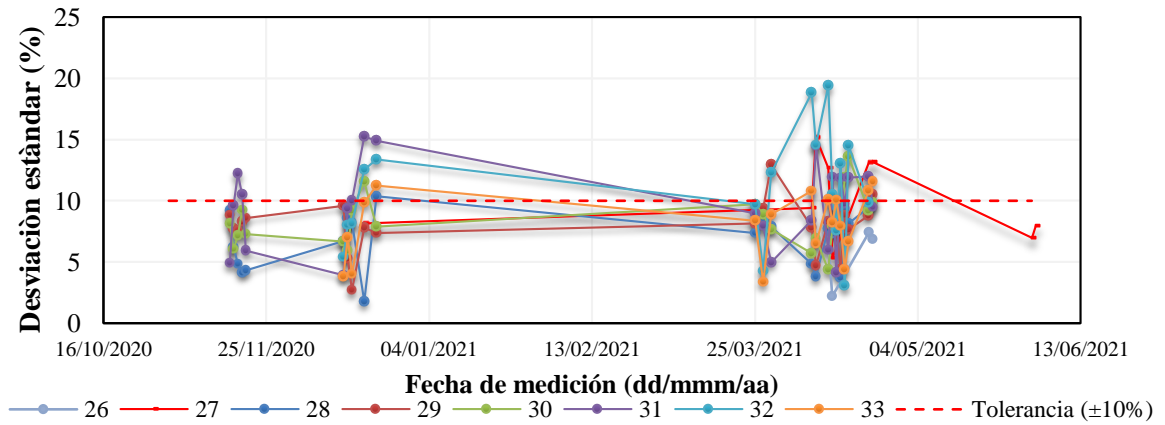


Figura 7.15 Precisión exposición ambiental detectores fijos - Monitor de área

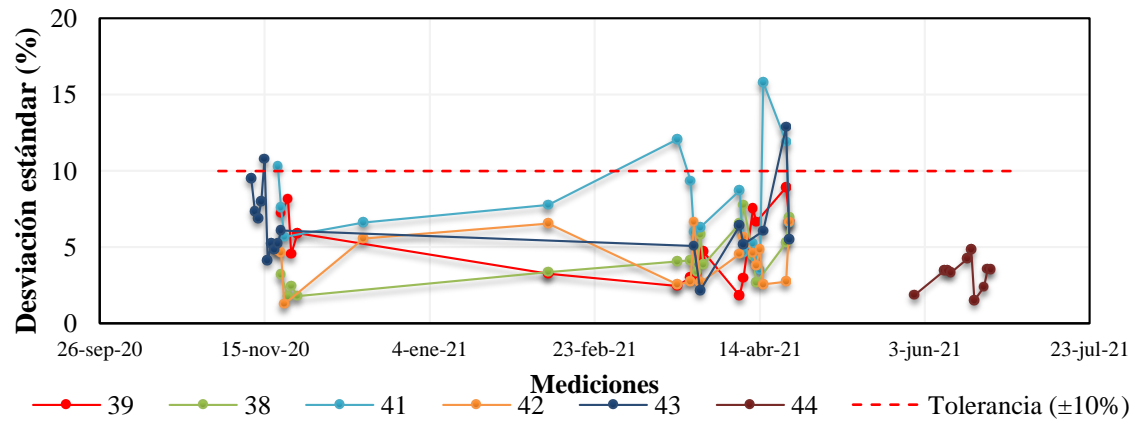


Figura 7.16 Precisión exposición ambiental - Detector GM portátil

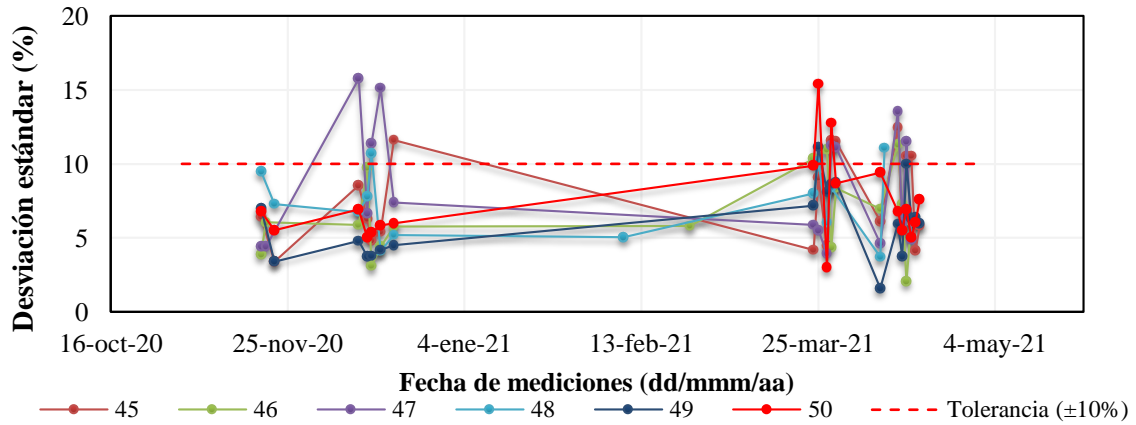


Figura 7.17 Precisión exposición personal - Dosímetro de lectura directa

- **Valores de referencia calculados a partir de las expresiones teóricas.**

**A. Contaminación superficial\***

$$CR_{\text{Ref}} = \frac{\text{Tasa de emisión superficial}}{\text{Área de la fuente}} = \frac{521 \text{ DPS}}{100 \text{ cm}^2} = 5,21 \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2}$$

**B. Exposición radiactiva\***

$$\dot{X}(0,10) = \frac{\pi * 7,789E^{-5} \frac{mSv \cdot m^2}{h} * 3,47E^5 \frac{\text{MBq}}{m^3} (1 - e^{-6,98m^{-1} \cdot 2,62E^{-2}m}) \ln \left( \frac{1,56E^{-2}m^2 + 0,10m^2}{0,10m^2} \right)}{6,98 \text{ m}^{-1}}$$

$$\dot{X}(0,10) = 0,04767 \frac{mSv}{h} = 48,77 \frac{uSv}{h}$$



Tabla 7.1 Comparación de aproximaciones de tasa de exposición para una fuente tipo gotero y una fuente puntal a diferentes distancias.

Distancia (m)	Tasa de exposición [uSv/h]		Error	
	Fuente tipo gotero	Fuente tipo puntal	Ea [uSv/h]	Er (%)
0,01	2502,03	5400,50	2898,47	115,84
0,02	963,89	1350,13	386,23	40,07
0,03	485,42	600,06	114,64	23,62
0,04	287,17	337,53	50,36	17,54
0,05	188,41	216,02	27,61	14,66
0,06	132,67	150,01	17,34	13,07
0,07	98,31	110,21	11,90	12,11
0,08	75,69	84,38	8,69	11,48
0,09	60,04	66,67	6,63	11,05
<b>0,10</b>	<b>48,77</b>	<b>54,01</b>	<b>5,24</b>	<b>10,74</b>
0,20	12,30	13,50	1,20	9,75

\*Valores calculados considerando la fecha actual 19/07/21

A partir de estos datos se aprecia que el error incrementa de manera potencial a medida que la distancia entre el detector de radiación ionizante y la fuente radiactiva se reduce.

#### d. Dependencia direccional

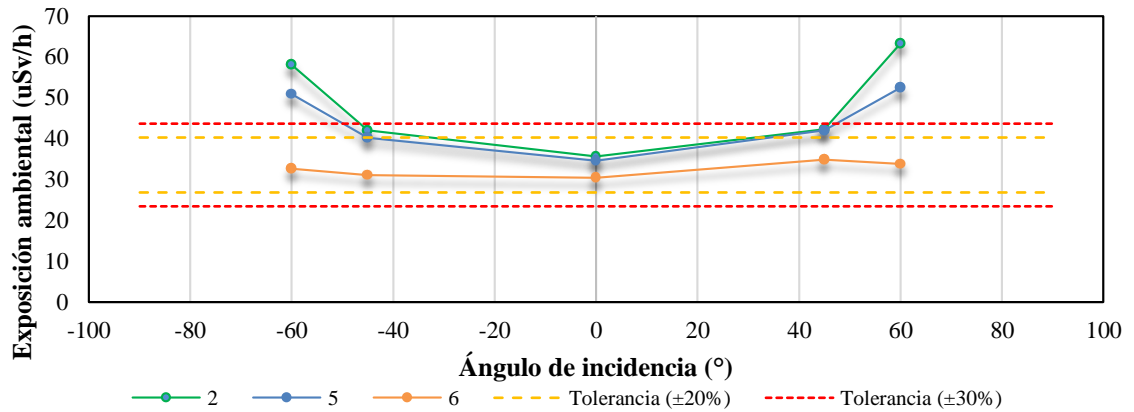


Figura 7.18 Dependencia direccional exposición ambiental - Sonda GM

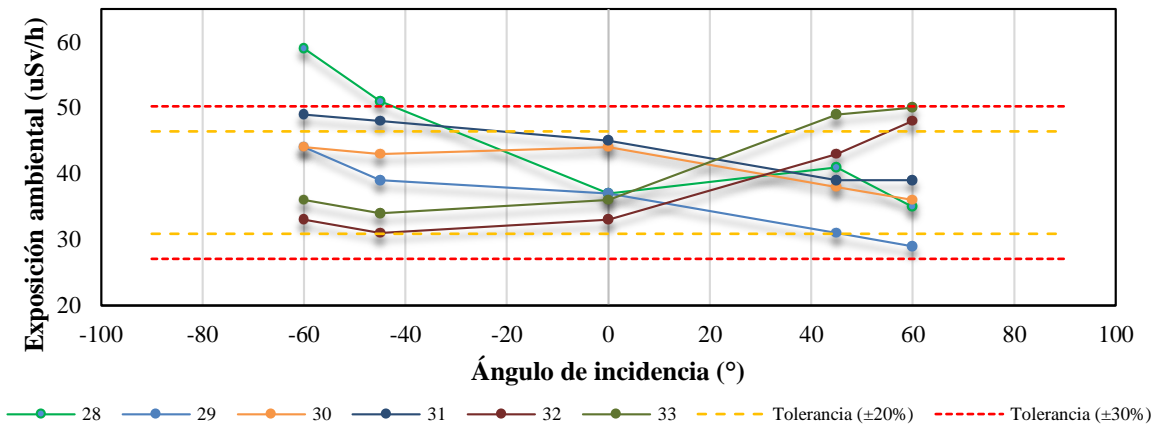


Figura 7.19 Dependencia direccional exposición ambiental - Monitor de área

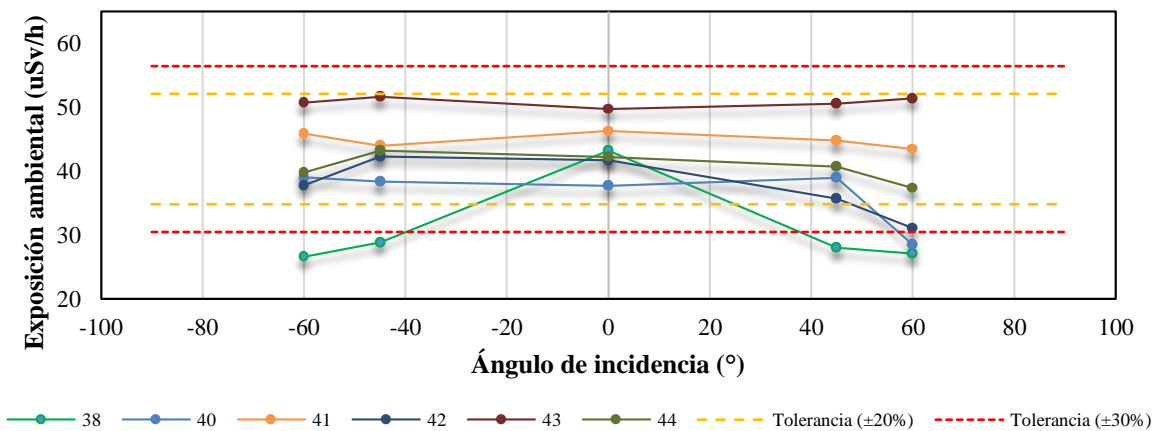


Figura 7.20 Dependencia direccional exposición ambiental - Detector GM portátil

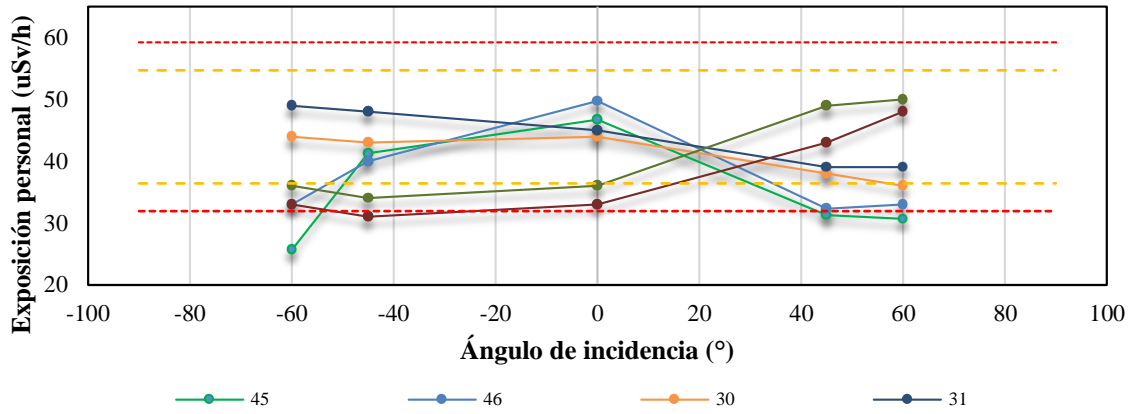


Figura 7.21 Dependencia direccional exposición personal - Dosímetro de lectura directa

### C. Verificaciones inmediatas

#### a. Constancia

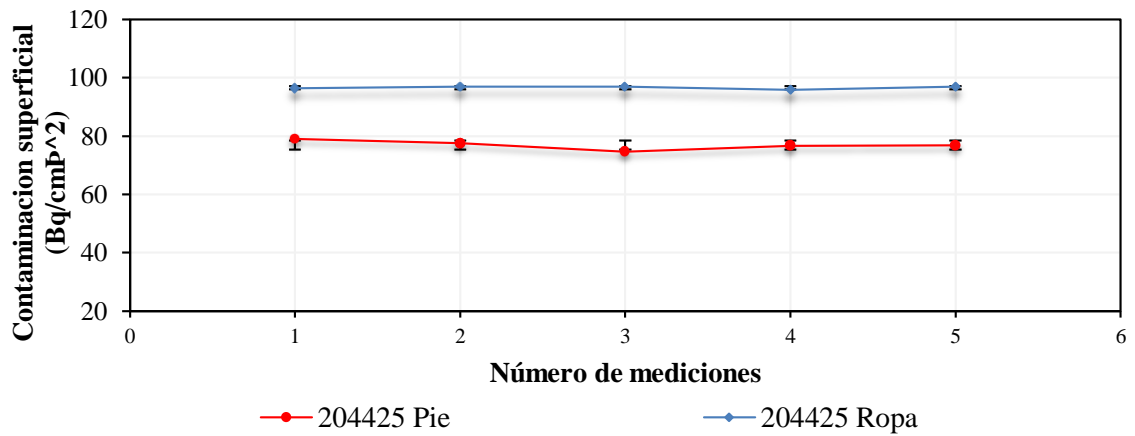


Figura 7.22 Constancia contaminación superficial detectores fijos – Ingreso

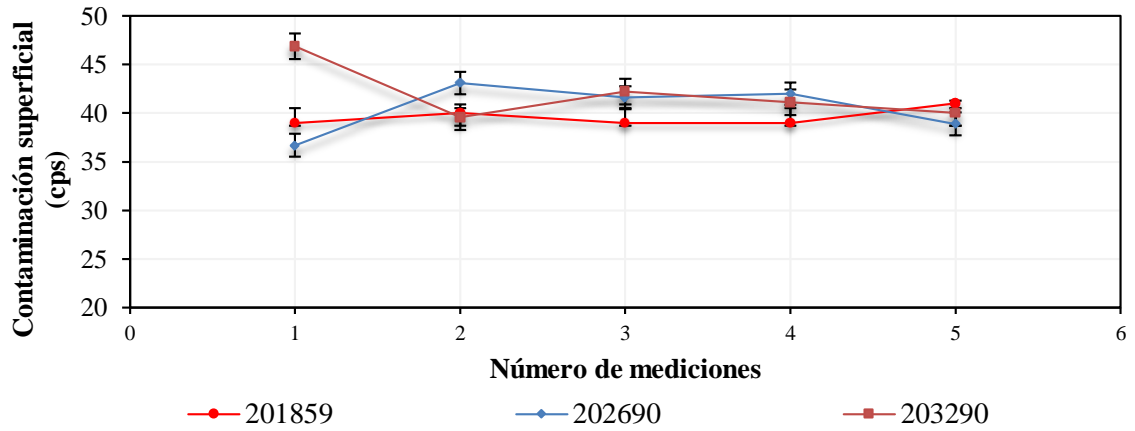


Figura 7.23 Constancia contaminación superficial detectores portátiles – Salida

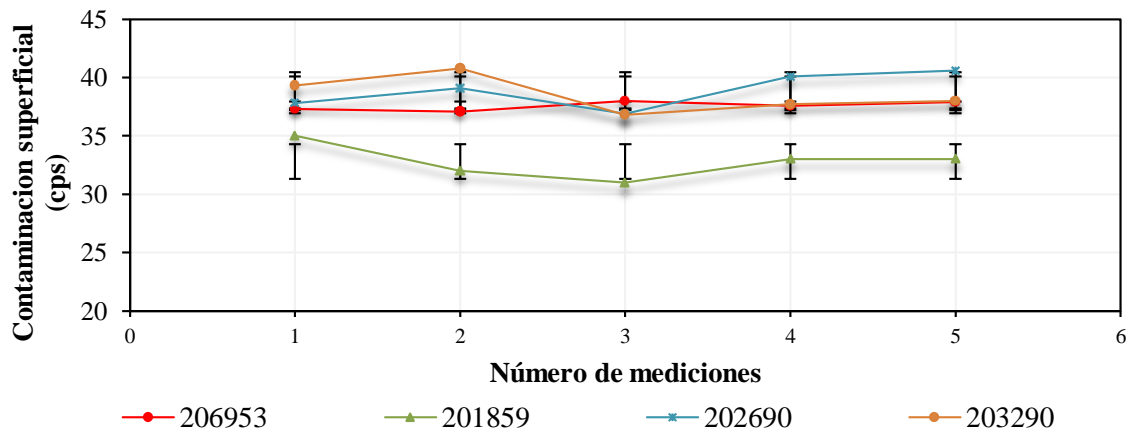


Figura 7.24 Constancia contaminación superficial detectores portátiles - Ingreso

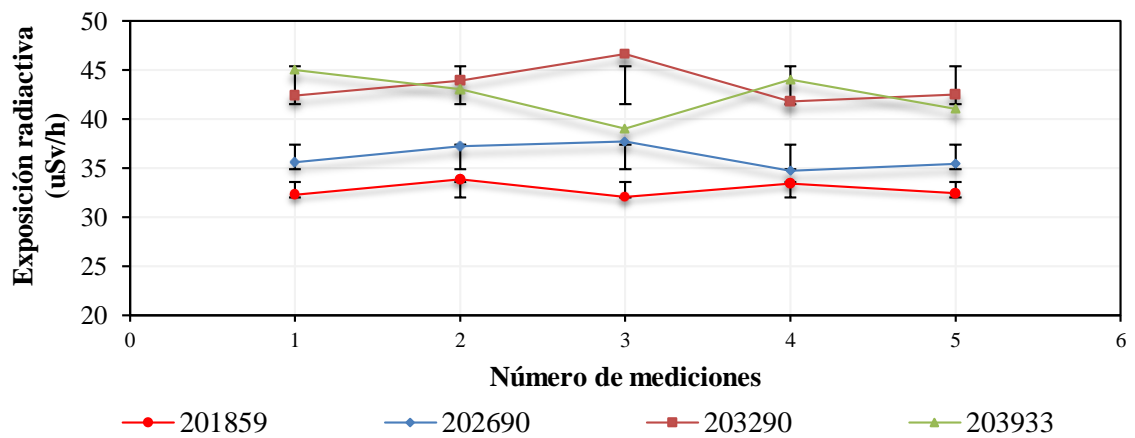


Figura 7.25 Constancia exposición radiactiva detectores portátiles – Salida

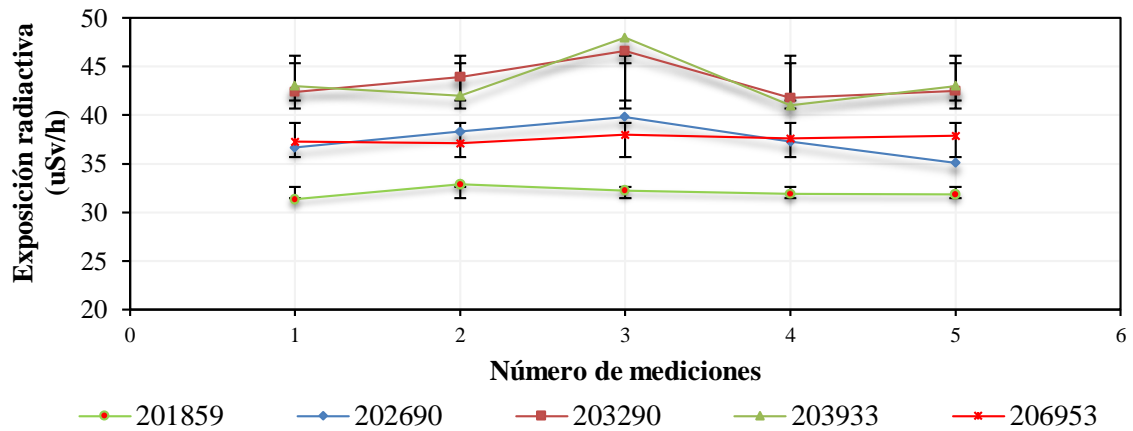


Figura 7.26 Constancia exposición radiactiva detectores portátiles - Ingreso

#### D. Matriz de calificación intervalos de verificación e intervalos de calibración

Número detector	Tipo de instrumento	Puntajes				Total	Verificación (mes)
		Tiempo en servicio	Entorno de uso	Frecuencia de uso	Criticidad		
1	Detector de radiación GM - Sonda	18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
2		18,8	16,7	25,0	6,3	66,7	6
3		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
4		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
5		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
6		18,8	16,7	25,0	12,5	73,0	6
7		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
8		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
9		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
10		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
11		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
12		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
13		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
14		6,3	16,7	25,0	18,8	66,7	6
15		6,3	16,7	18,8	18,8	60,5	6
16		6,3	16,7	18,8	18,8	60,5	6
17		6,3	16,7	18,8	18,8	60,5	6
18		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
19		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
20		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3

21		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
22		18,8	16,7	25,0	18,8	79,2	3
23		6,3	16,7	25,0	18,8	66,7	6
24		6,3	16,7	25,0	18,8	66,7	6
25		25,0	25,0	25,0	18,8	93,8	3
26	Primalert 10	25,0	25,0	12,5	18,8	81,3	3
27		25,0	25,0	12,5	18,8	81,3	3
28		25,0	16,7	12,5	18,8	73,0	6
29	Primalert monitor de área	25,0	16,7	12,5	18,8	73,0	6
30		25,0	16,7	6,3	6,3	54,2	6
31		25,0	16,7	12,5	18,8	73,0	6
32		25,0	16,7	12,5	18,8	73,0	6
33		25,0	16,7	12,5	18,8	73,0	6
34 M	Monitor de Radiación de M&P	18,8	16,7	6,3	12,5	54,2	6
34 P		18,8	16,7	6,3	12,5	54,2	6
35 M		25,0	16,7	18,8	18,8	79,2	3
35 P		25,0	16,7	18,8	18,8	79,2	3
36 M		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
36 P		12,5	16,7	25,0	18,8	73,0	6
37	Monitor de Radiación de M&P	6,3	16,7	25,0	18,8	66,7	6
38	Inspector Radiation Alert	25,0	25,0	12,5	12,5	75,0	3
39		25,0	25,0	12,5	12,5	75,0	3
40	Contador de Radiación Geiger- Müller	25,0	16,7	25,0	18,8	85,5	3
41		18,8	16,7	6,3	12,5	54,2	6
42		18,8	16,7	6,3	12,5	54,2	6
43		12,5	16,7	6,3	6,3	41,7	9
44		6,3	16,7	6,3	6,3	35,5	9
45		12,5	16,7	12,5	18,8	60,5	6
46	Dosímetro de lectura directa	12,5	16,7	12,5	18,8	60,5	6
47		12,5	16,7	12,5	18,8	60,5	6
48		12,5	16,7	12,5	18,8	60,5	6
49		12,5	16,7	12,5	6,3	48,0	9
50		12,5	16,7	12,5	18,8	60,5	6

## E. Extensión intervalos de calibración – ejemplo

Tabla 7.2 Ejemplo extensión de intervalos de calibración [90], datos simulados para un detector de radiación ionizante gaseosos Geiger Müller

<b>Geiger Müller</b>				
<b>Año</b>	<b>Corrección</b>	<b>Cambio respecto a la medición anterior</b>	<b>Error máximo permitido (%)</b>	<b>Periodo de calibración año</b>
<b>1</b>	1,10	0,00	0,30	
<b>2</b>	0,99	0,19	0,30	<b>Primer análisis</b>
<b>Primera decisión: periodo de calibración pasa a ser de 2 años</b>				
<b>4</b>	0,87	0,15	0,30	<b>Segundo análisis</b>
<b>Segunda decisión: periodo de calibración pasa a ser de 4 años</b>				
<b>8</b>	0,66	0,39	0,30	<b>Tercer análisis</b>
<b>Tercera decisión: periodo de calibración pasa a ser de 3 años</b>				
<b>11</b>	2,20	0,31	0,30	<b>Cuarto análisis</b>
<b>Cuarta decisión: periodo de calibración pasa a ser de 2 años</b>				
<b>13</b>	0,95	0,19	0,30	...

## F. Costos por calibraciones

Tabla 7.3 Proyección costo internacional sin IVA (cambio de dólar 2020)

	<b>\$</b>	<b>Unidades</b>
<b>Costo por unidad</b>	1.007.000	39
<b>Costo por unidad - especiales*</b>	2.014.000	11
<b>Costo por envío</b>	3.600.000	4 - 5
<b>Total</b>		\$79.427.000

Tabla 7.4 Proyección costo nacional

	<b>\$</b>	<b>Unidades</b>
<b>Costo por unidad</b>	202.476	39
<b>Costo por unidad - especiales*</b>	404.952	11
<b>Costo por envío</b>	1.000.000	4 - 5
<b>Total</b>		\$17.351.036

\* Se considera equipos especiales a los que tiene dos modos de operación

Tabla 7.5 Costo por fallo en equipos después de calibración

Equipos	\$	Unidades
Detector de manos y pies (panqueca)	3.078.263	1
Electrómetro Unidos E	29.651.014	1
Octavius 4D	114.000.000	1
Quick Check	38.211.198	1
Sondas GM	15.404.800	4
Total		\$200.345.275

### G. Sintaxis generación código QR

Las solicitudes de códigos QR admiten los siguientes parámetros de consulta de URL después del carácter “?” en la URL raíz:

Tabla 5.1 Sintaxis generación códigos QR [80]

Parámetro	Descripción
http://chart.apis.google.com/chart?	URL raíz
cht=qr	Especifica un QR
chs=250x250	Tamaño de la imagen
chl=<datos>	Los datos a codificar. Los datos pueden ser dígitos (0-9), caracteres alfanuméricos, bytes binarios de datos o kanji. No puede mezclar tipos de datos en un código QR. Los datos deben tener codificación URL UTF-8. Tenga en cuenta que las URL tienen una longitud máxima de 2K, por lo que si desea codificar más de 2K bytes (menos los demás caracteres de la URL), deberá enviar sus datos mediante POST <sup>25</sup> .
choe=<codificación de salida>	Cómo codificar los datos en el código QR. Estos son los valores disponibles: <ul style="list-style-type: none"> <li>• UTF-8 [predeterminado]</li> <li>• Shift_JIS</li> <li>• ISO-8859-1</li> </ul>
chld=<nivel de corrección de errores> <margen>	Nivel de corrección de errores: los códigos QR admiten cuatro niveles de corrección de errores para permitir la recuperación de datos perdidos, mal leídos u oscurecidos. Se logra una mayor redundancia a

<sup>25</sup> <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTTP/Methods/POST>



costa de poder almacenar menos datos. Mira el apéndice para los detalles. Estos son los valores admitidos:

- L - [Predeterminado] Permite la recuperación de hasta un 7% de pérdida de datos
- M: permite la recuperación de hasta un 15% de pérdida de datos
- Q: permite la recuperación de hasta un 25% de pérdida de datos
- H: permite la recuperación de hasta un 30% de pérdida de datos

Margen: el ancho del borde blanco alrededor de la parte de datos del código. Esto está en filas, no en píxeles. (Consulte a continuación para saber qué filas hay en un código QR). El valor predeterminado es 4.

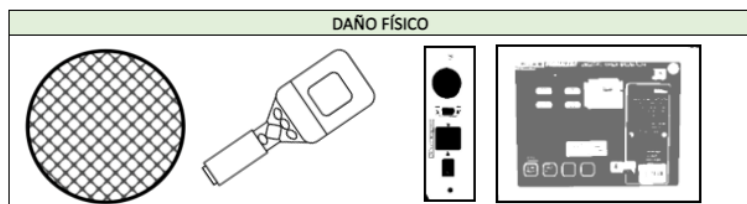
## H. Formatos de registro

- Verificaciones rutinarias

### a. Inspección inicial

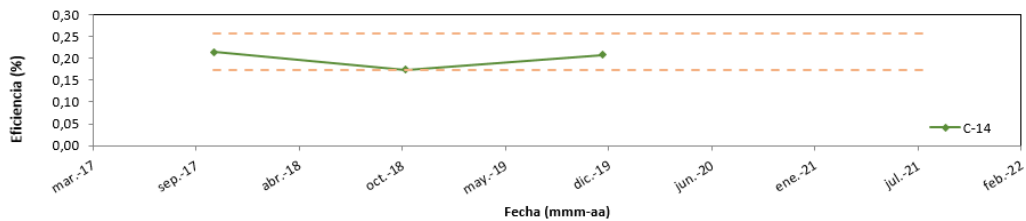
INSPECCIÓN INICIAL										
Fecha		ENE - MAR (2021)		ABR - JUN (2021)		JUL - SEP		OCT - DIC (2020)		
Evaluación	Ítem	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	
Inspección física	Soporte y la cubierta en buen estado	X		X				X		
	Sin señales de abolladuras o perforaciones (sensor)	X		X				X		
	Cables externos sin daños o defectos	X		X				X		
	Pantalla de lectura no tiene fracturas	X		X				X		
	Aguja indicadora sin obstrucción o doblada	-		-				-		
	Interruptor de encendido y botones selectores buenos	X		X				X		
Audio	Se genera sonido de detección y/o de alarma	X		X				X		
	Enciende el equipo con normalidad	X		X				X		
Alimentación	Pantalla enciende con claridad	X		X				X		
	Voltaje de batería es el indicado	-		-				X		
	Batería sin sustancias extrañas como óxidos o sales	X		X				X		
Operación	Botones de operación responden a la indicación dada	X		X				X		
	Software e interfaz de usuario se ejecutan normal	X		X				X		
OBSERVACIONES										

ESTADO BATERÍA		
Fecha	Ene - Jun	Jul - Dic
Batería 1 (V)		1,557
Batería 2 (V)		1,555
Valor de Ref (V)		1,5
Er (%)		3,67

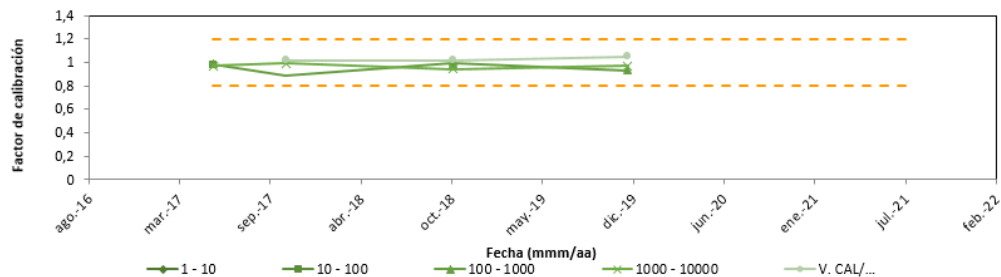


## b. Certificados de calibración

CONTAMINACIÓN RADIACTIVA											
EVALUACIÓN CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN											
Eficiencia (%)											
Laboratorio	SGC	SGC	SGC								
Fecha	26/10/17	02/11/18	18/11/19								
C-14	0,215	0,174	0,208								
Cs-137											
Cl-36	0,725	0,694	0,775								
Sr-90+Y-90	0,717	0,575	0,741								
Tolerancia	0,20										

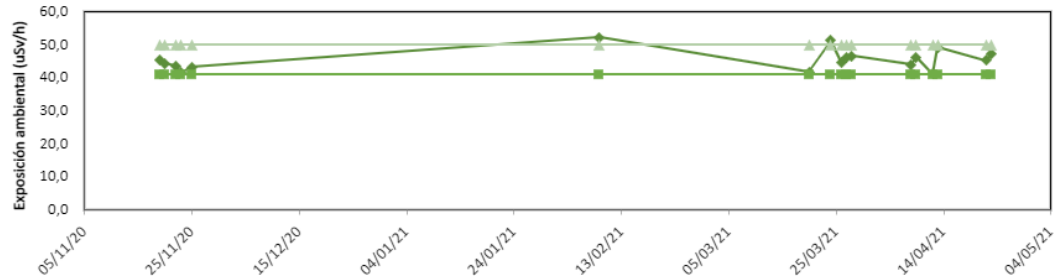


TASA DE EXPOSICIÓN AMBIENTAL											
EVALUACIÓN CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN											
Factor de calibración											
Laboratorio	NI	SGC	SGC	SGC							
Fecha	19/05/17	26/10/17	29/10/18	18/11/19							
1 - 10											
10 - 100	0,981										
100 - 1000	0,986	0,890	0,990	0,930							
1000 - 10000	0,967	0,990	0,940	0,970							
V. CAL/AUTOESC		1,020	1,020	1,05							
Tolerancia	0,2										



### c. Constancia

CONSTANCIA (±10%)												
LECTURA DE FONDO (uSv/h)												
Fecha	19/11/20	20/11/20	22/11/20	23/11/20	25/11/20	09/02/21	20/03/21	24/03/21	26/03/21	27/03/21	28/03/21	08/04/21
Mediciones	0,20	0,50	0,30	0,25	0,49	0,08	0,29	0,11	0,45	0,30	0,28	0,08
<b>MEDICIONES (uSv/h)</b>												
Mediciones (uSv/h)	49,9	38,6	46,1	45,6	42,7	52,1	42,6	50,1	43,8	43,8	47,3	44,9
	45,6	45,0	43,3	42,5	42,7	52,0	40,7	49,8	46,5	47,3	47,6	45,1
	46,9	46,2	41,5	40,6	42,6	50,8	40,5	51,7	47,0	47,6	46,7	41,9
	44,6	48,0	42,4	39,6	45,8	54,3	42,2	54,0	45,4	44,4	46,6	43,6
Promedio (uSv/h)	45,4	44,2	43,5	41,4	43,1	52,1	41,6	51,3	44,6	46,1	46,4	43,9
Tolerancia	0,1											



### d. Exactitud

EXACTITUD (±30%)	
<b>Características de la fuente</b>	<b>Valor</b>
Radioisótopo	Cesio 137
Fecha de referencia	15-nov-11
Fecha actual	22-jul-21
Tiempo de vida media (años)	30,05
Área de la fuente (cm <sup>2</sup> )	100
Tasa de emisión superficial CDO (s <sup>-1</sup> )	651
Tasa de emisión superficial actual (s <sup>-1</sup> )	521

Parametros para contaminación radiactiva	
Área ventana detector Ad (cm <sup>2</sup> )	15,000
Eficiencia del equipo para la energía B max Ei (%)	0,702
Probabilidad emisión β por radionúclido Ed (%)	0,940
Eficiencia de la fuente de Contaminación Es (cps/dps)	0,500
F. Cont (β) Cs-137 (cm <sup>-2</sup> * dps/cps)	0,202

$$FCont(\beta) = \frac{1}{A_d * \epsilon_i * \epsilon_d * \epsilon_s}$$

PROMEDIO MEDICIONES (Bq/cm <sup>2</sup> )												
Fecha	11/11/20	19/11/20	20/11/20	22/11/20	23/11/20	11/12/20	12/12/20	13/12/20	14/12/20	15/12/20	24/03/21	25/03/21
C.Rad Exp (Bq/cm <sup>2</sup> )	7,972	7,843	8,254	7,609	7,984	8,055	8,578	8,611	8,469	7,556	7,442	8,449
C.Rad Ref (Bq/cm <sup>2</sup> )	5,290	5,287	5,287	5,286	5,286	5,280	5,280	5,279	5,279	5,279	5,246	5,245
Error relativo (%)	50,7	48,3	56,1	43,9	51,0	52,6	62,5	63,1	60,4	43,1	41,9	61,1

EXACTITUD (±30%)	
<b>Características de la fuente</b>	<b>Valor</b>
Radioisótopo	Cesio 137
Fecha de referencia	1-nov-15
Fecha actual	22-jul-21
Tiempo de vida media (años)	30,05
Actividad inicial (Bq)	7,91E+06
Actividad actual (Bq)	6,93E+06

VALORES DE REFERENCIA ACTUALES		
Tasa de exposición	X̄ (mSv/h)	X̄ (mR/h)
Distancia (m)	F. T. Gotero	
0,10	0,0488	5,5590

$$\dot{X}_0(h) = \pi G (C_v / u) (1 - e^{-u t}) \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2}$$

Fecha	11/11/20	19/11/20	20/11/20	22/11/20	23/11/20	11/12/20	12/12/20	13/12/20	14/12/20	15/12/20	24/03/21	25/03/21
H* Exp. (uSv/h)	43,2	39,0	39,0	39,3	37,5	37,8	38,2	41,3	38,6	36,0	43,7	45,2
H* Ref. (uSv/h)	49,54	49,51	49,51	49,50	49,50	49,44	49,44	49,44	49,44	49,43	49,12	49,12
Error relativo (%)	12,9	21,2	21,2	20,7	24,3	23,6	22,7	16,5	21,9	27,2	11,0	8,0

## e. Precisión

PRECISIÓN (±10%)												
Fecha	19/11/20	20/11/20	22/11/20	23/11/20	25/11/20	09/02/21	20/03/21	24/03/21	26/03/21	27/03/21	28/03/21	08/04/21
D. est (uSv/h)	3,29	3,60	1,98	2,45	1,40	1,28	1,25	1,67	1,88	2,17	0,85	1,31
Precisión (%)	7,25	8,14	4,55	5,92	3,24	2,46	3,00	3,25	4,21	4,70	1,82	2,98
OBSERVACIONES												

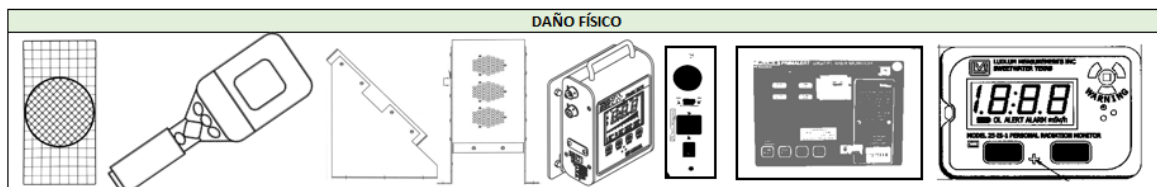
## f. Dependencia direccional

DEPENDENCIA DIRECCIONAL (10 cm)										
Ángulo\Fecha	19-nov					20-nov				
	Lecturas			Promedio (uSv/h)	E. r (%)	Lecturas			Promedio (uSv/h)	E. r (%)
-60	90	92,5	92,1	91,5	23,5	87,1	85,9	86,1	86,4	26,6
-45	104	103	101	102,7	14,2	111	103	108	107,3	8,8
0	117,0	120,0	122,0	119,7	0,0	113	118	122	117,7	0,0
45	105	103	101	103,0	13,9	86,2	84,5	87,2	86,0	26,9
60	87,7	85,2	84,3	85,7	28,4	69,8	69,9	70,4	70,0	40,5
OBSERVACIONES										

## • Verificaciones inmediatas

### a. Inspección inicial

INSPECCIÓN INICIAL						
Evaluación	Fecha	Ítem	SALIDA		INGRESO	
			SI	NO	SI	NO
Inspección física		Soporte y la cubierta en buen estado	X		X	
		Sin señales de abolladuras o perforaciones (sensor)	X		X	
		Los cables externos sin daños o defectos	-		-	
		Pantalla de lectura no tiene fracturas	X		X	
		Aguja indicadora sin obstrucción o doblada (analógico)	-		-	
Audio		Interruptor de encendido y botones selectores buenos	X		X	
Alimentación		Se genera sonido de detección y/o de alarma	X		X	
		Enciende el equipo con normalidad	X		X	
		La pantalla enciende con claridad	X		X	
		El voltaje de batería es el indicado	X		X	
Operación		Batería sin sustancias extrañas como óxidos o sales	X		X	
		Botones de operación responden a la indicación dada	X		X	
		Software e interfaz de usuario se ejecutan normal	X		X	
OBSERVACIONES						



## b. Evaluación certificados

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN					
No	Fecha	Ítem	INGRESO		
			OK	NO OK	
1		Nombre del laboratorio	X		
2		Número de certificado	X		
3		Datos de usuario	X		
4		Datos de equipo	X		
5		Modo de calibración	X		
6		Método de calibración	X		
7		Patrones trazables	X		
8		Fecha de operación y vigencia del certificado	X		
9		Responsable de calibración	X		
10		Factores de calibración contaminación radiactiva		X*	
11		Rangos de calibración exposición ambiental	NA		
12		Rangos de calibración exposición personal	NA		
13		Otros:	N		
OBSERVACIONES	Los resultados de los factores se encuentran en tolerancia ( $\pm 20\%$ ) excepto para energías inferiores a 400 keV ( $\pm 34,5\%$ ) respecto a la anterior calibración				

## c. Constancia

CONTAMINACIÓN RADIATIVA									
RESULTADOS									
LECTURA DE FONDO									
Medic. (Bq/cm <sup>2</sup> )	0,13				0,20				
MEDICIONES (cps)									
SALIDA	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Prom - S	INGRESO	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Prom - I
	6,45	5,22		5,84		7,02	5,37		6,20
	6,10	5,34		5,72		6,98	5,73		6,36
	6,22	5,10		5,66		7,17	5,84		6,51
	6,31	5,47		5,89		6,21	5,55		5,88
	6,49	5,50		6,00		6,78	5,29		6,04
Prom. (Bq/cm <sup>2</sup> )	5,69				5,99				

