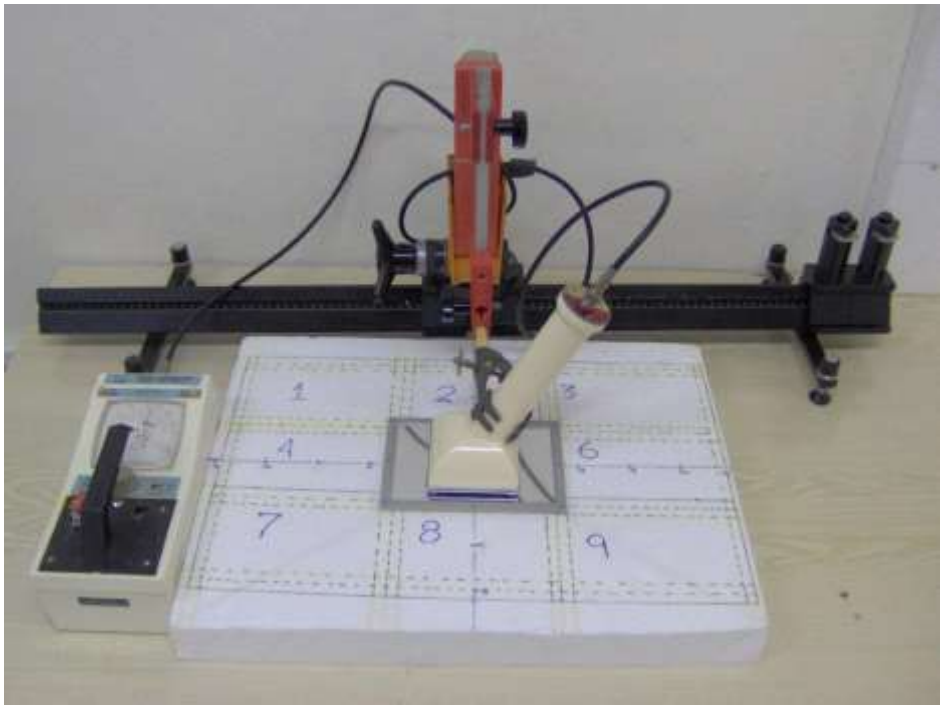
**CITMA**

**INSTITUTO SUPERIOR DE TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS APLICADAS**

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN CIENCIAS**

**ESPECIALIDAD DE FÍSICA NUCLEAR**

# "IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE MONITORES DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL"




**AUTOR:**
Lic. José Antonio Tamayo García

**TUTORES:**
Ing. Gonzalo Walwyn Salas
Dr.C. Juan Carlos Benítez Navarro

**Especialista consultante:** Ing. Néstor Cornejo Díaz

*La Habana, junio de 2008.*

***DEDICATORIA***

***"A mis padres, que han materializado en mí algunos de sus anhelados sueños"***

***AGRADECIMIENTOS***

*A los profesores, por su dedicada labor.*

*A mis compañeros de curso, por permitirme compartir los conocimientos.*
*A mi esposa por haber sido el sostén y el resorte que estimula mi crecimiento profesional sin dejar de cumplir con la exigencia de sus labores profesionales, de su papel de madre, esposa, hija, hermana y el de ama de casa.*

*A mis familiares por haber comprendido la necesidad de superarme y por su preocupación y ayuda brindada.*

*A los colegas del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones que han aportado conocimientos, equipamiento, bibliografía y tiempo: Néstor, Mercedes Salgado, Castillo, Benítez, Gilberto, Stefan, Gonzalo, Carrazana, Peralta, Manuel, Gil, Dennys, Capote, Ania, etc.*

*Al Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD) de Brasil por haberme acogido en su lecho y permitirme la capacitación. En especial Manoel Matos Ramos, Jefe Técnico del Laboratorio Nacional Metrología de las Radiaciones Ionizantes (LNMRI), por haber aportado conocimientos, bibliografía y logística para el desarrollo de esta investigación.*

*A los padres de Gema, Alexis y Zenia por la ayuda ofrecida en la impresión de la tesis.*

*A Miguel Prendes Alonso por la confianza depositada en mi y darme apoyo logístico para la realización de este trabajo.*

*A mis hijas Deneb y Melissa por haber ayudado a convertir los datos en formato digital y sacrificar parte de su tiempo libre.*

*A mi madre que ha tenido que esperar muchos fines de semana por mi presencia y perdonar siempre mi ausencia.*

*A mi padre que quería un hijo médico pero le salió físico*

*A mi Suegro por los buenos consejos brindados y por haber asumido las tareas hogareñas que no pude realizar.*

*A mi cuñada Tere por su estímulo moral.*

*A todos,* ***Muchas Gracias***

## RESUMEN

En los últimos años las organizaciones nacionales e internacionales encargadas de la protección radiológica, han adoptado medidas para minimizar los riesgos derivados de las exposiciones que se producen como consecuencia del uso pacífico de las radiaciones ionizantes en las industrias, la salud pública, la investigación y otras prácticas. En Cuba el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) a través de un Programa Ramal Nuclear gerenciado por la Agencia de Energía y Tecnologías de Avanzada (AENTA) deposita en el Centro Nacional de Seguridad Nuclear todo el poder legislativo para que se cumplan todas las regulaciones nacionales emitidas.

Para garantizar el cumplimiento de los requisitos de seguridad es imprescindible que en las instituciones donde se realicen prácticas se elaboren programas de protección radiológica que satisfagan las necesidades de cada práctica y permitan luego su optimización. La vigilancia radiológica de zona y puestos de trabajo, tanto para las tasas de dosis como para **contaminación superficial** es un elemento esencial para lograr la efectividad de un programa de protección radiológica en las instituciones usuarias que trabajan con fuentes no selladas.

Cuba cuenta actualmente con servicios de **calibración** y verificación para instrumentación dosimétrica de radiación gamma y de rayos X, sin embargo no existía la posibilidad de la **calibración** de monitores de **contaminación superficial**. En su mayoría, esta instrumentación se encuentra en los módulos de medicina nuclear, aunque también es requerida en otras prácticas como la producción de isótopos, inspecciones de la autoridad reguladora, respuestas a emergencias radiológicas y los servicios de protección radiológica que brinda el CPHR, entre otros.

Acorde con la Norma ISO 7503: "*Evaluación de la* ***Contaminación superficial***" y con las guías del Organismo Internacional de Energía Atómica, como la Colección de Informes de Seguridad No.16: "*Calibración de Instrumentos de Vigilancia Radiológica*", la **calibración** de los instrumentos de medición de **contaminación superficial** se realiza mediante fuentes de referencia, con tasas conocidas de emisión por unidad de superficie, confeccionadas en correspondencia con los requisitos de la norma ISO 8769: "*Fuentes de referencia para la calibración de equipos de medición de contaminaciones superficiales*".

La diversidad de radiaciones y energías emitidas por los radionucleidos de interés, conjuntamente con la marcada dependencia de la respuesta de los detectores con los tipos

de radiaciones y sus energías hace necesario conocer los factores de calibración para cada uno de estos radionucleidos. Esto pudiera ser realizado, en principio, de dos formas:

1. *Calibración en eficiencia*: La eficiencia del instrumento es determinada en el laboratorio de calibración para diferentes tipos de radiaciones y grupos de energías, utilizando fuentes de referencia para la radiación alfa, beta y gamma. Los factores de calibración del instrumento, específicos para los radionucleidos de interés, son calculados posteriormente ponderando los valores de eficiencia previamente obtenidos para cada tipo de radiación y grupo de energía con las probabilidades de emisión de los diferentes tipos de radiaciones del radionucleido en cuestión, utilizándose para ello la información proporcionada por las bibliotecas de datos nucleares.
2. *Calibración individual*: Para cada radionucleido, cuya **contaminación superficial** se necesita cuantificar, se determina el factor de calibración a partir de una fuente de calibración específica construida con el mismo radionucleido. Este método demanda contar con al menos una fuente de calibración para cada radionucleido de interés.

Como resultado de la tesis se han implementado los requisitos establecidos en las normas y recomendaciones internacionales para la calibración de los monitores de medición de contaminaciones superficiales. Los procedimientos para calibración en términos de eficiencia del instrumento de medición para los tipos de radiaciones y grupos de energías definidos en la Norma ISO 7503 fueron elaborados y las fuentes de calibración correspondientes construidas en conformidad con la Norma ISO 8769 fueron adquiridas. Se elaboraron e implementaron los procedimientos para obtener a partir de los valores de eficiencia del instrumento, los factores de calibración en términos de concentración de actividad ($s.Bq.cm^{-2}$ o $min.\ Bq.cm^{-2}$) para cualquier radionucleido, como método más versátil que permite obtener en cualquier momento el factor de calibración para el elemento radiactivo que se requiera.

Un monitor medidor de contaminación calibrado permite realizar mediciones confiables, reducir las fuentes de incertidumbres asociadas al proceso de medición y favorece la cuantificación de la **contaminación superficial** para la realización de evaluaciones radiológicas, tanto en condiciones de operación normal como tras la ocurrencia de cualquier suceso radiológico, posibilitando la optimización de los recursos que se destinan a las descontaminaciones de superficies y del personal.

El servicio implementado con fuentes de referencia acorde con la Norma ISO 8769, se pone a disposición de todos los usuarios del País que utilizan monitores de **contaminación superficial** en sus prácticas. La calibración de los instrumentos en términos de eficiencia

posibilita la determinación de los factores de calibración para cualquier radionucleido en términos de actividad superficial como recomienda la Norma ISO: 7503. Esto contribuye a la optimización de la Seguridad Radiológica del personal dedicado a la calibración y de los miembros del público, pues evita la preparación y manipulación sistemática de un número importante de fuentes patrones para cada radionucleido de interés y la gestión ulterior de dichas fuentes una vez declaradas en desuso. La implementación del resultado de esta tesis tiene un impacto científico importante, pues cuantificar los niveles de **contaminación superficial** posibilita una mejor comprensión y validación de los modelos de evaluación que predicen la transferencia de los radionucleidos a las superficies y el hombre, desde el punto de vista económico, la calibración de un instrumento en el área geográfica nuestra, cuesta alrededor de 700 €, y en el país hay un estimado de 30 instituciones que se han beneficiado con este servicio, cada instrumento necesita al menos una calibración anual. Por lo tanto si el país tuviera que calibrar los equipos fuera de su territorio tendría que invertir anualmente aproximadamente 30 800 € sin contar el costo de la transportación y el riesgo que se corre con la rotura o extravía del mismo. El aporte social está dado en que la cuantificación de las contaminaciones superficiales permite el establecimiento de niveles de referencia adecuados y optimizados para la adopción de medidas encaminadas a proteger a los trabajadores ocupacionalmente expuestos y miembros del público, en pleno cumplimiento de lo estipulado en nuestras regulaciones nacionales de Seguridad Radiológica.

La implementación del servicio en el país constituye un ahorro considerable de recursos humanos y materiales, garantizando la sostenibilidad de este servicio a un grupo importante de instituciones usuarias.

# ÍNDICE

**RESUMEN** 4

**INTRODUCCION** 9

**CAPÍTULO I REFERENTES TEÓRICOS**

1.1 Elementos de protección radiológica 20

1.2 Medidas de la radiación ionizante. Instrumentación 22

1.3 Detectores de ionización gaseosa 23

1.4 Cámaras de ionización. 23

1.5 Contadores proporcionales. 23

1.6 Contadores Geiger-Muller 26

1.7 Detectores de centelleo. 27

1.8 Detectores de semiconductor. 28

1.9 Monitores de contaminación superficial . 29

1.10 Caracterización del estado metrológico actual de los monitores de contaminación superficial en Cuba a través de un ensayo piloto 30

**CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS**

2.1 Instrumentación y equipo 35

2.2 Método de las posiciones contiguas 45

2.3 Determinación del perfil del detector 39

2.3.1 Determinación de la homogeneidad de las fuentes 40

2.3.2 Uso del factor de corrección 40

2.4 Cálculo de incertidumbre expandida 41

2.5 Incertidumbre estándar del Tipo A 42

2.6 Incertidumbre estándar del Tipo B 42

**CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN**.

3.1 Resultados del ensayo piloto 45

3.2 Resultados obtenidos de perfiles del detector 46

3.3 Resultado del estudio de uniformidad de las fuentes 76

3.4 Resultado del cáculo de la eficiencia de los detectores_____83
3.5 Resultado de la metodología implementada para la calibración de monitores de contaminación superficial_____90
3.6 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología_____91
3.7 Comparación entre el método del posicionamiento central y el de la posiciones contiguas_____94
3.8 Metodología implementada para la evaluación de la contaminación superficial___95
**CONCLUSIONES_____106**
**RECOMENDACIONES_____108**
**REFERNCIAS BIBLIOGRÁFICAS_____109**
**ANEXOS**

**ÍNDICE DE ABREVIATURA**

1. AENTA: Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada
2. CITMA: Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente
3. CNSN: Centro Nacional de Seguridad Nuclear
4. CPHR: Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones
5. CPM : Conteo por minuto
6. CPS : Conteo por segundo
7. GDR: Gestión de Desechos Radiactivos
8. ICRP: International Commission on Radiological Protection.
9. ISO: International Organization for Standardization
10. LSCD: Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica
11. MINSAP: Ministerio de Salud Pública
12. NIST: National Institute of Standards Technology
13. NPL: National Physical Laboratory
14. OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica
15. OMS: Organización Mundial de la Salud
16. OIT: Organización Internacional del Trabajo.
17. NBSR: Normas Básicas de Seguridad Radiológica.

## INTRODUCCION

En la actualidad la ciencia y la técnica se desarrollan de modo tan vertiginoso que a nadie le asombra los extraordinarios descubrimientos que en el mundo de hoy se han producido sobre cuestiones que hasta hace poco tiempo parecían indescifrables.

El conocimiento cada vez más profundo del macro y del micromundo por los científicos y los múltiples hallazgos derivados de estos estudios, hacen de este siglo recién terminado, el de mayor "aceleración" científica que ha conocido hasta ahora la historia de la humanidad. No obstante, a partir de este extraordinario desarrollo científico y técnico, el hombre continúa su incesante búsqueda en aras de encontrar las explicaciones de los diferentes hechos y fenómenos que le rodean, haciendo uso de los propios progresos científicos y tecnológicos alcanzados en todas las esferas de la vida social.

Este indetenible proceso de producción científica está dado en primer lugar, a que el hombre ha aprendido a conocer el mundo que le rodea, ha descubierto las leyes principales del proceso gnoseológico y ha elaborado métodos y formas efectivas para abordar el estudio de los diferentes problemas que la teoría y la práctica del desarrollo les imponen, creando una lógica y una metodología científico-investigativo cada vez más coherente con las peculiaridades de los problemas abordados.

El proceso cada vez más complicado del conocimiento hace que la búsqueda de formas y medios más efectivos para dominar las leyes del desarrollo de la realidad, constituya una necesidad de primer orden que asegure el continuo desarrollo de la sociedad y la supervivencia de la humanidad.

El surgimiento de nuevas disciplinas científicas, las intensas y contradictorias diferenciaciones en los procesos de integración de las ciencias y la producción y generalización de múltiples teorías seudocientíficas, han dado lugar al desarrollo de muchos métodos particulares del conocimiento y a su utilización indiscriminada en otras ramas del saber, adquiriendo significación científica general y haciendo que la lógica y la metodología del quehacer científico se aparte de la lógica interna, no solo del fenómeno objeto de estudio, sino del propio fenómeno de la producción del conocimiento científico.

No quiere decir esto que halla que desechar los problemas lógicos y metodológicos de las ciencias concretas, pues la propia complejidad de los fenómenos estudiados en correspondencia con la propia realidad, exige la interrelación de los estudios disciplinarios e interdisciplinarios, pero para que esto suceda es necesario que todo el proceso de

interrelación esté regido por una concepción integral, del estudio del fenómeno en todo sus nexos y conexiones y ello exige asumir una teoría y una concepción lógico-metodológica que posibilite el descubrimiento del conocimiento ”verdadero”

La dialéctica materialista, en concordancia con los conocimientos de las ciencias naturales, enseña que la naturaleza (como la sociedad) constituye un todo unitario en constante movimiento y desarrollo, que existe sin fuerzas sobrenaturales, sin una idea absoluta, ni limitado a un solo tipo de juicio o razonamiento.

La dialéctica materialista como ciencia establece las leyes del movimiento de la naturaleza, de la sociedad y el pensamiento humano, aporta una lógica y una metodología general para la adquisición del conocimiento, ofrece una lógica para operar los métodos científicos particulares de cada ciencia en el conocimiento de la realidad.

La investigación científica, como un proceso especialmente organizado del conocimiento, significa la introducción intelectual del hombre dentro de la realidad con el objetivo de descubrir nuevos conocimientos que permitan dar explicaciones de los hechos y fenómenos que transcurren en la naturaleza, la sociedad y el pensamiento humano.

El problema medular de cada investigador consiste en la búsqueda de este conocimiento nuevo, en la investigación de lo desconocido, del modo más correcto, auténtico y económico posible.

Las sustancias radiactivas emiten en su desintegración partículas y radiación electromagnética, cuya detección y cuantificación constituye una necesidad común en muchos procesos, tanto en el ámbito general de las aplicaciones pacíficas de la Energía Nuclear como en procesos tecnológicos y de investigación, donde se generan radiaciones ionizantes como por ejemplo: en tubos de rayos X, aceleradores de partículas, centrales nucleares, etc.

La exposición del hombre a las radiaciones ionizantes es un fenómeno inherente a su propia existencia, al encontrarse estas en forma natural en su entorno ambiental e incluso dentro de su propio organismo. Estas exposiciones, se conjugan adicionalmente, con las provenientes del empleo de fuentes artificiales en diversos sectores sociales.

Es también conocido que después del descubrimiento de los rayos X y de la radiactividad natural, se han acumulado suficientes evidencias sobre los daños producidos a la salud humana como consecuencias de este agente físico, por lo que se hace necesario que los programas de radioprotección, asuman la existencia de un riesgo radiológico que no puede evitarse, pero si restringirse. Por otra parte la aceptación social de los riesgos potenciales

derivados de las radiaciones ionizantes, está condicionada a los beneficios que estas aportan. Por tanto es necesario prestar especial atención a los aspectos relativos a la seguridad enmarcados en eficientes programas de protección radiológica, que minimicen los riesgos resultantes de acción de las radiaciones ionizantes sin limitar excesivamente sus bondades.

El uso de fuentes no selladas en las aplicaciones médicas y en el campo de las investigaciones ha venido incrementándose en las últimas décadas, tanto para fines de diagnóstico como para terapéuticos. Con el transcurso del tiempo los avances en el campo de la medicina nuclear han llevado a la utilización generalizada de radiofármacos, unido a un creciente desarrollo del equipamiento, así como un aumento del número y tipo de técnicas terapéuticas. La práctica médica es la más importante de las fuentes de exposición a radiaciones ionizantes en muchos países, aportando alrededor del 90 % de la dosis colectiva de la población mundial de entre todas las aplicaciones de las radiaciones ionizantes que el hombre utiliza.

En Cuba en los años venideros se prevé, el desarrollo de la terapia metabólica con otros radionúclidos que no son utilizados actualmente, la instalación de aceleradores lineales para radioterapia, de cámaras gamma y de equipos para radiología intervencionista, así como otros de radiodiagnóstico especializado y convencional. Actualmente existen 22 módulos de medicina nuclear funcionando en el país y se prevé un incremento de estos hasta llegar a 52. Esto implica que crecerá el número de puestos de trabajo que no serán monitoreados y aumentará el de trabajadores ocupacionalmente expuestos que incumplirán uno de los requisitos de seguridad.

Para garantizar los requisitos de seguridad en las prácticas donde se utilizan las radiaciones ionizantes, es necesario que estos programas de protección radiológica satisfagan las necesidades de cada práctica y permitan luego su optimización. La vigilancia radiológica de zona y puestos de trabajo, tanto para tasa de dosis como para contaminación superficial es un elemento esencial para lograr la efectividad de un programa de protección radiológica de instituciones usuarias que trabajan con fuentes radiactivas.

Un riesgo bien conocido en todo trabajo que implique manipulación de radionucleidos, es su dispersión incontrolada en el medio ambiente (atmósfera y aguas), y en superficies de trabajo. Esta situación supone la posibilidad, no solo de recibir exceso de radiación externa, sino también la posibilidad de que estos sean inhalados o ingeridos, con el correspondiente riesgo asociado de irradiación interna.

La verificación de la seguridad es uno de los requisitos de protección radiológica y los análisis de seguridad revelan el nivel de cumplimiento de los requisitos de seguridad, estos análisis de seguridad deben ser en lo posible, cuantitativos. El monitoreo periódico, de las dosis individuales, de la tasa de dosis, de la contaminación en los puestos de trabajo y de los efluentes líquidos y gaseosos, son la fuente de información básica para las evaluaciones de seguridad.

Los programas de monitoreo y de medición son requisitos que permiten verificar el cumplimiento de los objetivos de un programa de seguridad y protección. Las tareas de monitoreo y de verificación deberán realizarse solamente con equipos **calibrados** por instituciones o laboratorios reconocidos por la autoridad reguladora, a intervalos apropiados y los procedimientos de medición deben estar documentados y validados.

Uno de los requisitos establecidos por la Resolución Conjunta CITMA – MINSAP "Normas Básicas de Seguridad Radiológica" (NBSR), en sus Artículos 21 y 22 para garantizar la seguridad de los trabajadores ocupacionalmente expuestos y miembros del público, es la ejecución de un programa de vigilancia radiológica con equipos de medición adecuados, debidamente calibrados según intervalos de tiempo bien definidos y en correspondencia con patrones nacionales e internacionales. Además, con vistas a poder adoptar medidas de seguridad oportunas, en el Artículo 87, incisos a) y d) de las NBSR se requiere la definición de las magnitudes a medir y los niveles de referencia a partir de los cuales habrán de implementarse dichas medidas. Sin equipos de medición calibrados no es posible cumplir adecuadamente con los referidos requisitos de las NBSR.

Por otro lado, la Resolución 33 del Centro Nacional de Seguridad Nuclear, del 2001: "Guía para la implementación de los reglamentos de seguridad en la práctica de la Medicina Nuclear", en sus Artículos 1.2.12, 1.2.14 y 1.2.17 establece la obligatoriedad de realizar la vigilancia radiológica de zonas para la **contaminación superficial**, con equipos de medición adecuados y calibrados por laboratorios reconocidos.

Para llevar a cabo un monitoreo eficiente, el programa de protección radiológica debe contener entre otros aspectos la selección del ensayo, calibración y mantenimiento de los instrumentos apropiados. Para la medición y el muestreo deberán tenerse en cuenta la cantidad y rangos de medición de los equipos y los procedimientos de medición, verificación e interpretación de los resultados.

La confiabilidad de las mediciones depende en gran medida de la **calibración** de los instrumentos, la cual debe hacerse con fuentes de radiación cuyas tasas de emisión sean trazables a patrones mantenidos por laboratorios de calibración primarios o secundarios. En la actualidad, Cuba cuenta con los servicios de **calibración** y verificación para la instrumentación dosimétrica de radiación gamma y de rayos X.

**Situación problemática**

No existe una metodología implementada en Cuba para la calibración de monitores de **contaminación superficial** que garantice la trazabilidad de las mediciones al Sistema Internacional de Unidades.

**Problema científico**

¿Cómo implementar una metodología en Cuba para la calibración de monitores de **contaminación superficial**?

**Objeto de Investigación**

Le proceso de calibración de monitores de **contaminación superficial**.

**Campo de acción**

La calibración de monitores de **contaminación superficial** en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD) del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) para los usuarios de fuentes no selladas en Cuba.

**Objetivo General**

Garantizar la trazabilidad de las mediciones de **contaminación superficial** para los usuarios de fuentes no selladas del país hasta el Sistema Internacional de Unidades.

**Objetivos específicos**

1. Caracterizar el estado metrológico actual de los monitores de **contaminación superficial** del país.

2. Elaborar una metodología para la calibración de monitores de **contaminación superficial** en concordancia con las existentes internacionalmente.

3. Implementar la metodología para la calibración de monitores de **contaminación superficial**.

4. Analizar estadísticamente los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología.

**Población:** La investigación se realizó con 14 fuentes planas patrones (α, β y $\gamma$) del LSCD y 5 monitores medidores de contaminación pertenecientes al LSCD y al grupo de Gestión de Desechos Radiactivos (GDR) del CPHR.

**Muestra:** Cinco monitores medidores de contaminación pertenecientes al LSCD y al GDR y dos fuentes radiactivas α, seis fuentes β y seis $\gamma$.

**Idea a defender**

La implementación de una metodología para la calibración de monitores de contaminación superficial en el LSCD del CPHR garantizará la trazabilidad hasta el Sistema Internacional de Unidades para los usuarios de fuentes no selladas en Cuba.

**Tarea científica**

1. Determinación de los referentes teóricos relacionados con la calibración de monitores de **contaminación superficial**.

2. Caracterización del estado metrológico actual de los monitores de **contaminación superficial** existente en el país.

3. Elaboración de una metodología para calibración de monitores de **contaminación superficial** en concordancia con las existentes internacionalmente y que satisfaga las necesidades nacionales.

4. Implementación de una metodología para la calibración de monitores de **contaminación superficial**.

5. Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología.

**Novedad científica**

Por primera vez en el país se implementa una metodología para la calibración de monitores de **contaminación superficial**.

**Método de Investigación**

Como parte de la metodología de la investigación científica se hizo una revisión bibliográfica de la temática y se asimilaron los métodos y materiales recomendados y aceptados internacionalmente para la calibración de monitores de **contaminación superficial** por el OIEA. Para la calibración de los monitores de contaminación se utilizó el método de contrastación.

**Histórico - lógico:** Se profundizó en el estudio de los conocimientos históricos de las diferentes etapas por la que ha transitado la calibración de monitores de **contaminación superficial**, hasta llegar a los criterios más actuales de la literatura disponible. A partir de este estudio y análisis se describieron dos métodos de calibración y se realizaron comparaciones entre ellos.

**Analítico – Sintético:** Este método sirvió para la información teórico – práctica del tema y para el procesamiento de los resultados del ensayo piloto que se realizó.

**Estudio Documental:** Se utilizó para identificar los referentes teóricos, los documentos rectores y para revisar la documentación del ensayo piloto nacional de calibración de monitores de **contaminación superficial** durante dos años.

**Sistémico- estructural: Este método** propició la concepción y comprensión de las diferentes etapas de desarrollo por la que ha transitado la calibración de monitores de **contaminación superficial**.

**Método Estadístico:** Facilitó el análisis de los resultados obtenidos en la aplicación de los instrumentos.

**Métodos empíricos.**

**Diagnóstico inicial, parcial y total:**
A partir del diagnóstico se pudo evaluar el estado técnico metrológico actual del equipamiento existente en el país, la variedad y tipos de instrumentos, los diferentes usos y prácticas, determinar los factores que podían influir en los procesos de **calibración** y las necesidades de los usuarios.

**Muestreo de documentos**: Se realizó un muestreo de documentos para evaluar los diferentes criterios de tratamiento de la calibración de monitores de **contaminación superficial.**

**PreExperimento:** Para evaluar el estado técnico metrológico actual del equipamiento existente en el país, se realizó una **calibración** piloto de los monitores en uso. Esto permitió diagnosticar el estado técnico metrológico de más del 80% de la instrumentación. Esto posibilitó determinar las necesidades nacionales de equipamiento y de diferentes métodos de calibración debido a la diversidad de instrumentos y prácticas.

**Técnicas e Instrumentos**
**Entrevista**: A usuarios de fuentes de radiación no selladas para identificar sus necesidades para considerarlas en el modelo de **calibración** aplicado.

**Criterio de expertos:** Para la valoración de la factibilidad y trascendencia de la metodología implementada.
**Aportes teóricos prácticos:** Los resultados de este trabajo están dirigidos a todos los usuarios de fuentes radiactivas no selladas en el país.

- Permite cuantificar los niveles de contaminación radiactiva de cualquier superficie de trabajo, un local, un equipo, parte del cuerpo humano, etc. Contribuye a una mejor comprensión y validación de los modelos de evaluación que predicen la transferencia de los radionucleidos a las superficies y el hombre, tanto en condiciones de operación normal como ante la ocurrencia de sucesos radiológicos.

- Por primera vez se implementa en el país un servicio de calibración de monitores de **contaminación superficial**

- Se garantiza el aseguramiento metrológico de las mediciones de **contaminación superficial** en las prácticas con uso de fuentes no selladas del país.

- Con el trabajo realizado y los resultados obtenidos se da respuesta a uno de los objetivos específicos del programa ramal nuclear de la Agencia de Energía Nuclear y Tecnología de Avanzada para el período 2002 – 2006, correspondiente al campo de la Salud Humana, en lo concerniente a la protección radiológica. En este programa se incluye explícitamente el siguiente objetivo específico: ”Instauración de un sistema de metrología legal para la verificación y/o calibración de medidores de **contaminación superficial**”.

**Definiciones de términos**

**Actividad**: Se define como el número de transiciones nucleares espontáneas, d*N,* desde un estado de energía particular en un intervalo de tiempo dado, d*t.* En el sistema internacional de unidades la actividad se expresa en Becquerel (Bq) (1 Bq = 1 $s^{-1}$). [31]

**Actividad superficial por unidad de área:** Relación entre la actividad de los radionucleidos presentes en una superficie y el área de dicha superficie. [31]

**Tasa de emisión superficial**: Número de partículas que emergen de la superficie de la fuente con una energía dada por la unidad de tiempo. [31]

**Contaminación superficial**: Sustancia radiactiva depositada en una superficie delimitada. [28]

**Contaminación superficial fija:** Contaminación adherida a una superficie la cual no es removible o transferible bajo condiciones normales de trabajo. [31]

**Contaminación superficial removible:** Contaminación adherida a una superficie la cual es removible o transferible bajo condiciones normales de trabajo. [29]

**Medición directa de la contaminación superficial:** Medición de la **contaminación superficial** por medio de un medidor de contaminación o monitor. [ 30]

**Evaluación indirecta de la contaminación superficial:** Evaluación de la actividad en superficies removibles por medio de una frota.[30]

**Medidor de contaminación superficial**: Un medidor de **contaminación superficial** es un sistema de medición que incluye uno o más componentes electrónicos, designados para medir la contaminación superficial en término de actividad por unidad de área.[5]

**Monitor de contaminación superficial:** Un monitor de contaminación superficial es un monitor provisto con medios para dar una alarma audible o visual si la contaminación de una superficie particular excede los niveles predeterminados o si el valor medido no está dentro de los límites predeterminados ajustables.[5]

**Eficiencia de la fuente:** Relación de la tasa de emisión superficial y el número de partículas o fotones de igual tipo creado o liberado dentro de la fuente por unidad de tiempo.[30]

**Eficiencia del instrumento**: Relación entre la lectura neta del instrumento (conteo por unidad de tiempo) y la tasa de emisión superficial de la fuente (partículas o fotones emitidos por unidad de tiempo) en una geometría específica relativa a la fuente.

**Autoabsorción de una fuente:** Absorción de la fuente de la radiación la cual ocurre dentro del material de la misma fuente.[30]

**Trazabilidad:** La concepción de estabilidad a una calibración válida de un instrumento de medición o un patrón de medida, comparado paso a paso con un patrón superior aceptado o un patrón especificado.[30]

**Calibración:** Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, las relaciones entre los valores de las magnitudes indicadas por un instrumento de medición o sistema de medición, o valores representados por un material medido o un material de referencia, y los valores correspondientes realizados por un patrón.[27]

**Uniformidad:** Uniformidad de una superficie con respecto a una propiedad dada**,** expresado como una magnitud medida por unidad de área de superficie, indicando la reproducibilidad de esta propiedad sobre la superficie.[30]

**Incertidumbre:** Parámetro asociado con el resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente atribuido a la medición.[13]

**Incertidumbre estándar:** Incertidumbre del resultado de una medición como una desviación estándar.[13]

**Evaluación de Incertidumbre estándar de Tipo A:** Método de evaluación de incertidumbre por el análisis estadístico de series de observaciones.[13]

**Evaluación de Incertidumbre estándar de Tipo B:** Método de evaluación de incertidumbre por otros medios que el análisis estadístico de series de observaciones.[13]

**Incertidumbre expandida:** Magnitud definida en un intervalo sobre el resultado de una medición que pudiera ser esperado, para abarcar una fracción grande de la distribución de valores que pudieran ser razonablemente atribuidos a la medida.[13]

**Estructura de la tesis**:

El trabajo se ha realizado a partir de una introducción y tres capítulos.

**Capítulo I**: Se abordan los referentes teóricos relacionados con algunos elementos de protección radiológica y la detección y medida de los monitores de contaminación, a partir de diversos criterios, hasta llegar a los actuales de la literatura disponible.

**Capítulo II:** Se exponen los métodos utilizados en la investigación, los aspectos relacionados con la propuesta metodológica para la **calibración** de monitores de **contaminación superficial**, y la factibilidad para la implementación de los resultados.

**Capítulo III:** Se exponen los resultados de la investigación, y las recomendaciones de los aspectos más revelantes.

# CAPÍTULO I REFERENTES TEÓRICOS

## 1.1 Elementos de protección radiológica

Hace más de un siglo, el hombre descubrió la existencia de las radiaciones ionizantes, desde entonces, existe un esfuerzo constante para utilizarlas en su beneficio. También se ha ido tomando conciencia de que la utilización de las radiaciones ionizantes sin las debidas precauciones puede producir efectos perjudiciales para la salud humana, ya existen muchas evidencias de este daño, por lo que ha sido necesario tomar determinadas medidas de seguridad y protección para su uso.

El uso de materiales radiactivos en la industria, la investigación y la medicina genera inevitablemente desechos que requieren una adecuada gestión en condiciones de seguridad y protección radiológica en todas sus fases, desde su generación hasta su destino final. Cuba ha prestado desde sus inicios especial atención a la gestión segura de los desechos radiactivos que se generan.[8]

El esfuerzo humano para conocer mejor los beneficios y también los riesgos de la utilización de las radiaciones ionizantes por la sociedad no ha cesado. Dada su presencia en la naturaleza, su permanencia y continua acción sobre el ser humano y el medio ambiente, es necesaria su convivencia ya que forman parte intrínseca de la vida humana. El conocimiento científico acumulado durante muchos años ha ido configurando una disciplina técnica y científica que se conoce como “Protección Radiológica” que ha permitido establecer un conjunto de normas y métodos para su aplicación.

La protección radiológica tiene como objetivo básico el uso justificado y beneficioso de las radiaciones ionizantes, siempre que los riesgos asociados se hayan reducidos todo lo razonablemente posible. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) fundada en 1928 es el ente científico cuyas recomendaciones son seguidas por los Organismos Internacionales más relevantes en la materia (OIEA, OMS, OIT, etc.) y por diversos países.[6]

El Sistema de Protección Radiológica puede considerarse como potente y bien definido, contribuyendo de forma decisiva a los niveles de protección alcanzados hoy. No obstante su aplicación global es compleja y de difícil comprensión en general y otras veces por

limitaciones económicas. La protección radiológica ocupa el quehacer cotidiano de un número considerable de profesionales y tiene incidencia directa sobre muchos ciudadanos.

En los últimos años las organizaciones nacionales e internacionales encargadas de la protección radiológica, han adoptado medidas para minimizar los riesgos derivados de las exposiciones que se producen como consecuencia del uso de las radiaciones ionizantes en las industrias, la salud pública, la investigación y otras prácticas de uso pacífico, prestando especial atención a que se adopten regulaciones y se establezcan procedimientos para el control y la estimación de las dosis.

En Cuba el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), a través de un Programa Ramal Nuclear gerenciado por la Agencia Nuclear (AENTA) deposita en el Centro Nacional de Seguridad Nuclear todo el poder legislativo para que se cumplan las regulaciones nacionales e internacionales emitidas.

Uno de los requisitos establecidos por la Resolución Conjunta CITMA – MINSAP "Normas Básicas de Seguridad Radiológica" (NBSR), en sus Artículos 21 y 22 para garantizar la seguridad de los trabajadores ocupacionalmente expuestos y miembros del público, es la ejecución de un programa de vigilancia radiológica con equipos de medición adecuados, debidamente **calibrados** según intervalos de tiempo bien definidos y en correspondencia con patrones nacionales e internacionales.

Con la perspectiva de poder adoptar medidas de seguridad oportunas, en el Artículo 87, incisos a) y d) de las NBSR se requiere la definición de las magnitudes a medir y los niveles de referencia a partir de los cuales habrán de implementarse dichas medidas. Sin equipos de medición calibrados, es imposible cumplir adecuadamente con los referidos requisitos de las NBSR.

Por otro lado, la Resolución 33 del Centro Nacional de Seguridad Nuclear, del 2001: "Guía para la implementación de los reglamentos de seguridad en la práctica de la Medicina Nuclear", en sus Artículos 1.2.12, 1.2.14 y 1.2.17 establece la obligatoriedad de realizar la vigilancia radiológica de zonas para la **contaminación superficial**, con equipos de medición adecuados y **calibrados** por laboratorios reconocidos.

El proyecto y la tesis paralelamente desarrollados, han asimilado e implementado los requisitos establecidos en las normas y recomendaciones internacionales para la **calibración** de los equipos de medición de contaminaciones superficiales. Se han elaborado los procedimientos de calibración en términos de eficiencia del instrumento de medición para

los tipos de radiaciones y grupos de energías definidos en la Norma ISO 7503 y se han adquirido las fuentes de **calibración** correspondientes, construidas de conformidad con la Norma ISO 8769. Los procedimientos para obtener los factores de calibración en términos de concentración de actividad (s.Bq.cm$^{-2}$ o min. Bq.cm$^{-2}$) para cualquier radionucleidos a partir de los valores de eficiencia del instrumento para cada tipo de radiación y grupo de energía, fue implementado como método más versátil que permite obtener el factor de **calibración** para el elemento radiactivo que se requiera.[8]

## 1.2 Medidas de la radiación ionizante. Instrumentación

Las partículas en su interacción con la materia producen una serie de efectos que son función del tipo de partícula, de su energía y del medio con que interactúen. Las partículas en movimiento en un medio material, pierden progresivamente su energía cinética a lo largo de su trayectoria; esta reducción de la velocidad es consecuencia de la interacción entre la partícula y el medio. La energía absorbida por el medio se efectúa por transmisión de energía que se producen durante los choques. Estas colisiones pueden ser elástica, inelástica o radiactiva en dependencia del efecto que produzca sobre la materia.[9]

El proceso de ionización no es el único por el que la energía de una radiación puede ser transferida a un material. La excitación es otro fenómeno físico que también puede originar consecuencias físicas, químicas o biológicas. Estos efectos en la materia y su cuantificación son los que se utilizan en la práctica para la construcción de dispositivos de detección y medida de la radiación. Las sustancias que constituyen el volumen sensible de los detectores de radiación absorben energía procedente de la radiación que la atraviesa, lo que se traduce en efectos físicos y/o químicos medibles. Algunos de estos dispositivos simplemente perciben la existencia de la radiación y a veces su naturaleza, unos cuentan el número de partículas o fotones que llegan a su seno, otros son capaces de medir y discriminar la energía de la radiación depositada y otros determinan la cantidad de energía depositada.

Los métodos de medición de las radiaciones ionizantes se fundamentan en la detección de los efectos y partículas secundarias surgidos durante los procesos de ionización y excitación del medio al paso de las radiaciones.[8]

Del diagnóstico piloto (epígrafe 1.10) se pudo constatar que la respuesta de los monitores dependen entre otros factores de los detectores, se hace necesario una caracterización de los mismos teniendo en cuentas las ventajas y desventajas durante el proceso de detección.

## 1.3 Detectores de ionización gaseosa

Los detectores de ionización gaseosa están esencialmente constituidos por un recinto lleno de un gas a una presión determinada, del que se disponen dos electrodos aislados entre sí y al que se le aplica una diferencia de potencial. En condiciones normales sabemos que no circula corriente eléctrica entre los electrodos. Si una partícula o fotón logra alcanzar el espacio intereléctrico, el campo eléctrico existente entre los electrodos hará que los que los portadores eléctricos formados en la interacción se muevan hacia los electrodos de cargas opuestas; así en el circuito de detección se originará una corriente que puede ser medida y revelará la llegada de radiación al detector.[8]

## 1.4 Cámaras de ionización.

Las cámaras de ionización están constituidas también por un recinto lleno de gas en el que están inmersos dos electrodos aislados, que opera en zona de saturación donde se produce toda la captación de los portadores creados en la ionización primaria. Estas se clasifican en planas o cilíndricas atendiendo a la forma en que estén dotados sus electrodos y por su forma de operar pueden cámaras de corriente o de impulsos.[8]

Las cámaras de ionización de impulsos se utilizan preferentemente para la detección de fotones y partículas beta. Es necesario que para la espectrometría alfa la fuente radiactiva esté colocada en el interior de la cámara debido a su corto alcance; sin embargo, para detección de partículas beta se logran con fuentes externas a través de ventanas delgadas.

Para partículas alfa y beta que alcancen el volumen sensible de la cámara el rendimiento de detección es próximo al 100%; sin embargo, para fotones solo se logran rendimiento del orden del 1%. En trabajos espectrométricos las cámaras son muy desplazadas por detectores de semiconductores que proporcionan otras ventajas.[9]

Las cámaras de ionización han encontrado otras aplicaciones importantes como medidores de actividad para cuantificar la cantidad de material radiactivo que se suministra a los pacientes en medicina nuclear, como medidores de tasa de dosis, Dosímetros personales tipo condensador empleados para el control individual, etc.

## 1.5 Contadores proporcionales.

En el caso de los contadores proporcionales operan en la zona de multiplicación de carga al unirse la ionización primaria con la secundaria, debido a que los electrones son acelerados

hacia el ánodo, ganando suficiente energía para impactar sobre las moléculas de gas neutras y producir su ionización. En los contadores proporcionales por lo general se emplea una geometría coaxial, de cátodo cilíndrico y ánodo en forma de un hilo metálico muy fino. Por lo que el campo eléctrico en las en las proximidades del hilo se hace suficientemente intenso como para alcanzar las zonas de Geiger o proporcional llegando a valores de tensión en el orden de los kV. A esta distancia crítica se produce el fenómeno de multiplicación de carga con formación de una avalancha localizada en una zona estrecha del hilo.[8]

La amplitud total del impulso originado puede determinarse mediante la siguiente relación:

$$\Delta V = \frac{A \cdot n \cdot e}{C} \qquad (1.1)$$

donde A, es el factor de multiplicación gaseosa cuyo valor depende de la tensión de polarización, n el número de pares ión-electrón formados en la ionización primaria, e la carga electrónica y C la capacidad asociado al hilo. Para que un contador sea realmente proporcional su factor de multiplicación debe ser independiente del número de pares formados en la ionización primaria. El orden de los impulsos de tensión generados en los contadores proporcionales es de 0.1 V y requiere de una amplificación de señal.[8]

El contador proporcional en la práctica ha encontrado muchas aplicaciones: como espectrómetro trabaja satisfactoriamente para las partículas ionizantes que disipen toda su energía en el volumen sensible del detector, para medir actividades muy bajas en muestras ambientales o como detector de neutrones. Sin embargo, para emisores alfa y beta de baja energía la idea antes expresada dificulta la medida, debido a que la absorción de la ventana reduce drásticamente el rendimiento de detección. Esto se resolvió, introduciendo una muestra radiactiva en el volumen activo del detector. Con este propósito se diseñaron los contadores proporcionales de flujo continuo de gas que operan con una ligera sobrepresión respecto a la atmosférica.

**Tipos de contadores proporcionales**

- **Contadores proporcionales sellados lleno de xenón:** El material más usado frecuentemente para la lámina de la ventana es el titanio de espesor aproximadamente 5 mg/cm$^2$ para el cual puede hacerse el área del detector. Otros materiales tales como el berilio o el aluminio pueden ser utilizados, pero debido a la porosidad de estos metales tienen limitaciones con respecto al espesor mínimo y tamaño de la ventana producida.[8]

**Ventajas**

a) Alta eficiencia de estos instrumentos para rayos x en el rango de energía desde 3 keV – 50 keV.
b) Sensibilidad para electrones de energías mucho mayores de 60 keV.
c) Detectores de grandes áreas con ventanas típicamente entre 100 $cm^2$ y 500 $cm^2$ de área disponible.
d) No gastan gas durante el conteo.
e) No son afectados por cambios normales en las condiciones ambientales.

**Desventajas**

a) Baja eficiencia de los instrumentos para fotones con energías mayores que 50 keV y electrones de baja energía.
b) Los electrones con energía menor de 60 keV no son detectados.
c) Si la ventana del material es dañada el detector es irreparable.

- **Contadores proporcionales de flujo gaseoso:** Normalmente el material de la ventana es una lámina de poliéster aluminizado de espesor 0.3 $mg/cm^2$ – 0.9 $mg/cm^2$, el área del detector sensible cubierta puede llegar a 1000 $cm^2$. Estas ventanas no tienen el gas fijo, y por consiguiente es requerido el flujo continuo de gas o un rellenado periódico.[8]

**Ventajas**

a) Alta eficiencia de los instrumentos para electrones de energía por debajo de 30 keV.
b) Si la ventana es dañada puede ser reparada.
c) Baja respuesta relativa a la radiación gamma por encima de 30 keV.
d) Grandes detectores con áreas de la ventana entre 100 $cm^2$ y 1000 $cm^2$ están disponibles.

**Desventajas**

a) Baja eficiencia de los instrumentos para fotones si es usado butano o metano como gas de conteo.
b) El valor de la eficiencia para baja energía es incrementado con el uso de mezcla de argón – metano.
c) El butano y el metano son gases inflamables.

- **Contadores proporcionales de flujo gaseoso sin ventana:** Este tipo de instrumento fue desarrollado la detección de electrones de baja energía y es utilizable con área de 10 $cm^2$ y 50 $cm^2$. Para detectores de grandes áreas, el área sensible puede ser ajustada con una rejilla del cátodo para reducir la interferencia eléctrica desde la superficie para esta

medida. Los contadores gaseosos como el argón – metano o argón – $CO_2$ son comúnmente usados, con una tasa de flujo gaseoso de 2 l/min. a través de la ventana entrante.[8]

**Ventajas**

a) Alta eficiencia para ambos electrones de baja energía y radiación beta por debajo de 1 keV bajo condiciones favorables.

**Desventajas**

a) Posible interferencia electrostática cerca de la superficie medida, especialmente superficies con baja conductividad eléctrica.

## 1.6 Contadores Geiger-Muller

Normalmente el material de la ventana es de mica de alrededor de 2 mg/cm$^2$ de espesor y el área de la ventana utilizable es de 20 cm$^2$. Los contadores Geiger-Muller por lo general no son sustituibles ellos tienen la ventaja de ser simples y de bajo costo, y pueden ser usados en ciertas aplicaciones donde sean considerados un número de electrones de conversión emitidos con energías menores de 60 keV.[8]

El funcionamiento del detector corresponde a la zona Geiger, es decir, si se eleva la tensión de polarización por encima de la zona de proporcionalidad limitada, los impulsos resultantes alcanzan la misma amplitud independientemente de ionización primaria debida a la partícula detestada.

La amplitud de los impulsos en la zona Geiger, crece con la tensión aplicada debido a la intensidad creciente de las descargas. La variación del factor de multiplicación explica que la amplitud de los impulsos producidos puede llegar a 10 V, amplitud suficiente que puede activar los sistemas electrónicos de registros sin necesidad de amplificación previa. Esta cualidad lo distingue del resto de los detectores.

Un sistema Geiger en su forma simple no suministra datos acerca de la naturaleza o energía de las partículas detectadas, por lo que no era posible hacer espectrometría. Actualmente Geiger con paredes exteriores cubiertas por diferentes materiales proporcionan una compensación energética adecuada para determinadas magnitudes dosimétricas, estas cualidades han encontrado diversas aplicaciones como medidores de **contaminación superficial**, alarmas gamma, equipos medidores de tasa de dosis, etc.

## 1.7 Detectores de centelleo.

Basan su funcionamiento en el registro de la luz fluorescente emitida por ciertos materiales al recibir la acción de la radiación ionizante. Una parte de la luz absorbida, la emiten en forma de luz visible o ultravioleta. Este detector funciona como espectrómetro, con las ventajas adicionales de un alto rendimiento de detección y un corto tiempo de detección.[8]

Se distinguen fundamentalmente por su elevada velocidad de respuesta que es muy útil para tasas de conteo altas, buena linealidad en energía y mejor sensibilidad a la radiación gamma.

En la espectrometría gamma los más usados son los cristales de NaI (TI) cilíndricos y encapsulados de hasta 10 cm de diámetro y 10 cm de altura acoplado por medio de un contacto óptico y un fotomultiplicador. Sin embargo, el centelleo en fase líquida posee una serie de características propias, que han hecho a este tipo de técnica un campo separado de la espectroscopia gamma. Aunque perfectamente es posible la detección de radiación electromagnética, la principal aplicación está en detectar partículas beta y alfa con rendimientos muy elevados. El hecho de que la sustancia radiactiva se disuelva en el seno mismo del centellador, permite eliminar los problemas de la autoabsorción en muestras alfa y beta.[8]

Una de las principales dificultades del centelleo líquido es la extinción química que produce una disminución de la eficiencia de recuento y una degradación del espectro de altura de impulsos hacia la zona de bajas energías.

La **calibración** de radionucleidos beta es una de las aplicaciones más importantes del centelleo en la fase líquida. Se alcanzan rendimientos de detección de nucleidos de energías máximas elevadas ($^{89}$Sr, $^{90}$Y, $^{32}$P) prácticamente del 100%, en núcleos beta de baja energía algo por debajo del 50% para el $^{3}$H y el 90% para el $^{14}$C. Debido a que la extinción química hace que la eficiencia de recuento disminuya, es necesario que para la obtención de la actividad de las curvas que indiquen la variación de la eficiencia de recuento con la extinción química (curvas de calibración).

Otras aplicaciones no menos importante de los detectores de centelleo líquido es la detección de radionucleidos que se desintegran por captura electrónica, (en la que da lugar a una reestructuración del nucleido hijo) la detección de emisores gamma y la detección de luz Cherenkov.

## 1.8 Detectores de semiconductor.

Los detectores de radiación de semiconductores son estructuras cristalinas fabricadas básicamente con germanio y silicio. Al atravesar la radiación ionizante un semiconductor, esta puede liberar gran cantidad de portadores de carga eléctrica. Mediante la recogida de estos portadores de carga eléctrica puede detectarse el paso de la radiación y en determinadas condiciones medir su energía.[8]

A estos dispositivos se le llama en ocasiones cámara de ionización en estado sólido. Tienen notables ventajas respecto a los detectores de ionización gaseosa, particularmente para detección de radiación gamma y rayos X, por sus mejores valores de rendimiento y resolución energética; aunque también se utilizan para detectar partículas alfa y beta.

En la opinión del autor los detectores son más o menos eficientes en dependencia de sus características físicas y el uso que se le de. Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas conocidas que estos ofrecen, los detectores más eficientes para la calibración de radionucleidos beta son los de centelleo en la fase líquida. Se alcanzan rendimientos de detección de nucleidos de energías máximas elevadas prácticamente del 100%, en núcleos beta de baja energía algo por debajo del 50%.

Los contadores proporcionales llenos de xenón son más eficientes para electrones de energías mayores de 60 keV. Los Contadores proporcionales de flujo gaseoso tienen alta eficiencia de los instrumentos para electrones de energía por debajo de 30 keV, y baja respuesta relativa a la radiación gamma por encima de 30 keV. Los contadores proporcionales de flujo gaseoso sin ventana tienen alta eficiencia para ambos electrones de baja energía y radiación beta por debajo de 1 keV bajo condiciones favorables.

## 1.9 Monitores de contaminación superficial

Los monitores de contaminación beta – gamma hasta hace poco tiempo utilizaban detectores de ionización en sus versiones contador Geiger o cámara de ionización, provistos de ventanas suficientemente delgadas para permitir la medida de emisores beta puro de baja energía como el $^{14}C$. En estos instrumentos no solo estaba mal definido el ángulo sólido de medida, sino también que los resultados se expresaban en cps. Tal indicación desde el punto de vista práctico, tiene dificultades conocidas, ya que al variar la eficiencia de detección para cada radionucleido, se requiere la calibración con fuentes patrón, a fin de que el propio

usuario, mediante una tabla de factores calibración procediera a la conversión de resultados de cps a Bq/cm$^2$.[8]

Como se puede apreciar en el epígrafe donde se trató el detector Geiger, es desventajoso usarlo como monitor de **contaminación superficial** por su baja eficiencia para determinado rango de energía.

Hace algunos años se han introducidos dos mejoras en los monitores de contaminación, la primera la utilización de contadores proporcionales, de gran sensibilidad y excelente exactitud, y la segunda, la incorporación de microprocesadores que permiten expresar directamente el resultado en Bq/cm$^2$. la operación se realiza almacenando en la memoria del microprocesador el resultado de la medida, cps y multiplicándola por el respectivo factor de calibración (Bq.s/cm$^2$), medido previamente por el fabricante en los casos más utilizado, o por el propio usuario para otros radionucleidos mediante fuentes radiactivas calibradas.[8]

Otra variante introducida en equipos modernos ha sido el paso de la lectura analógica a la digital, que en principio puede parecer al usuario como más favorable. La realidad es que el resultado de una medida está representado por números que fluctúan más o menos rápidamente, por lo que hay que alcanzar una aptitud de lectura para promediar mentalmente la sucesión de datos. El operador de un monitor con lectura digital debe conocer que en cada medida debe tomarse el tiempo necesario, que como mínimo es de unos 20 -30 segundos, para expresar el resultado, lo cual produce extrañeza en el usuario principiante, que espera leer la pantalla de un monitor digital con la misma facilidad que su reloj digital de pulsera.[8]

Los límites de **contaminación superficial** están cuantificados en términos de actividad superficial (Bq/cm$^2$) por lo que constituye una necesidad para el usuario que el resultado final de las mediciones quede expresado en esa misma unidad de medida.

Acorde con la Norma ISO 7503: "*Evaluación de la* ***Contaminación superficial***" y con las guías del Organismo Internacional de Energía atómica, como la Colección de Informes de Seguridad No.16: "*Calibración de Instrumentos de Vigilancia Radiológica*", la calibración de los instrumentos de medición de contaminación superficial se realiza mediante fuentes de referencia, con tasas conocidas de emisión por unidad de superficie, confeccionadas en correspondencia con los requisitos de la norma ISO 8769: "*Fuentes de referencia para la calibración de equipos de medición de contaminaciones superficiales*".[28, 30]

La diversidad de radiaciones y energías emitidas por los radionucleidos de interés, conjuntamente con la marcada dependencia de la respuesta de los detectores con los tipos de radiaciones y sus energías hace necesario conocer los factores de calibración para cada uno de estos radionucleidos. Esto pudiera ser realizado, en principio, de dos formas:

a) *Calibración en eficiencia*: La eficiencia del instrumento es determinada en el laboratorio de calibración para diferentes tipos de radiaciones y grupos de energías, utilizando fuentes de referencia para la radiación alfa, beta y gamma. Los factores de calibración del instrumento, específicos para los radionucleidos de interés, son calculados posteriormente ponderando los valores de eficiencia previamente obtenidos para cada tipo de radiación y grupo de energía con las probabilidades de emisión de los diferentes tipos de radiaciones del radionucleido en cuestión, utilizándose para ello la información proporcionada por las bibliotecas de datos nucleares.
b) *Calibración individual*: Para cada radionucleido, cuya **contaminación superficial** se necesita cuantificar, se determina el factor de **calibración** a partir de una fuente de calibración específica construida con el mismo radionucleido.

El segundo método demanda contar con un número significativo de fuentes de referencia, al menos una para cada radionucleido de interés. Esto se hace más crítico si se considera que un número importante de estos radionucleidos presenta cortos período de semi-desintegración radiactiva.

Debido a lo anterior, la **calibración** con varias fuentes, realizada en términos de eficiencia del instrumento de medición para los tipos de radiaciones y grupos de energías, se ofrece como un método más versátil que permite obtener en cualquier momento el factor de calibración para el elemento radiactivo que se requiera.

## 1.10 Caracterización del estado metrológico actual de los monitores de contaminación superficial en Cuba a través de un ensayo piloto.

Con el objetivo de implementar una metodología para la calibración de monitores de **contaminación superficial**, se ha realizado un estudio con una muestra de los monitores medidores de la **contaminación superficial**, de manera que la información acumulada pueda servir de elemento primario para la elaboración de la metodología.

La práctica médica es la más importante de las fuentes de exposición a radiaciones ionizantes en muchos países, aportando alrededor del 90 % de la dosis colectiva de la población mundial de entre todas las aplicaciones de las radiaciones ionizantes que el hombre utiliza.

La vigilancia radiológica de zonas y puestos de trabajo, tanto para tasa de dosis como para **contaminación superficial** es un elemento esencial para lograr la efectividad de un programa de protección radiológica de instituciones usuarias que trabajan con fuentes no selladas. Hoy se desconoce el estado técnico del equipamiento existente en el país y no se sabe cuáles son las necesidades actuales, ni el país tiene aseguramiento metrológico a estas necesidades.

Durante el período (2004-2006) se realizó una calibración piloto de los monitores en uso en el país. Esto permitió diagnosticar el estado técnico metrológico de más del 80% de la instrumentación y determinar las necesidades fundamentales de los usuarios.

El ensayo piloto se inició con un mínimo de fuentes radiactivas planas en existencia en el LSCD en espera del resto que se adquirió posteriormente a través del proyecto del OIEA CUB/3/002. Estas fuentes radiactivas planas de $^{14}C$, $^{36}Cl$, $^{90}Sr$ y $^{241}Am$ (Imagen 1) en condiciones geométricas determinadas se comparó el resultado de las lecturas del instrumento con la actividad superficial de ellas y el resultado obtenido se expresó en $Bq/cm^2$. Estas son fuentes radiactivas de referencias o fuentes radiactivas patrones que cuentan con los certificados de **calibración** de North American Scientific que a su vez es trazable al National Institute of Standards and Tecnology en cooperación con Nuclear Energy Institute.

Imagen 1: Imagen de las fuentes radiactivas de $^{90}Sr$, $^{36}Cl$, $^{241}Am$ y $^{14}C$ usadas durante el ensayo piloto

Los monitores utilizados para el estudio fueron suministrados por un grupo clientes que gentilmente accedieron a dicha convocatoria. En la siguiente imagen aparece una muestra representativa de los monitores que fueron utilizados.

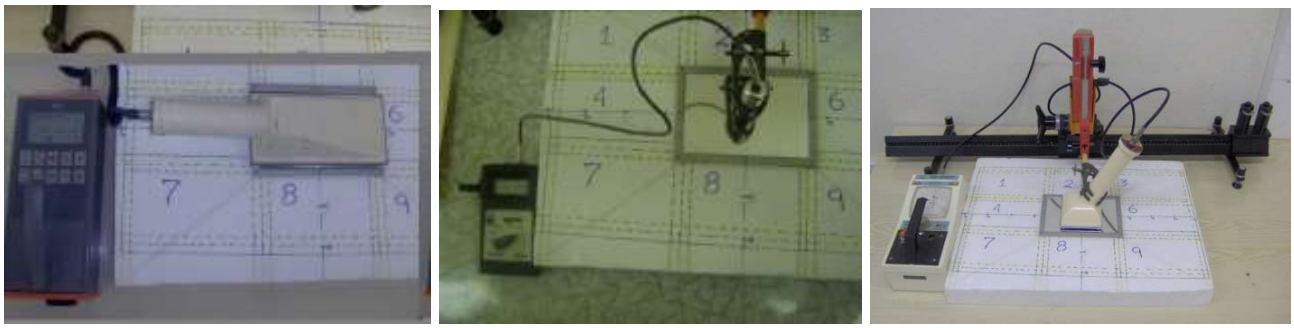


Imagen 2: Imágenes de algunos monitores de contaminación usados durante el ensayo piloto: de izquierda a derecha (PCM5/1, Electra 1B y el Supermini).

Durante el ensayo piloto, el método de **calibración** empleado fue el de comparación de las indicaciones del instrumento con los valores convencionalmente verdaderos de actividad superficial de la fuente patrón según reporte técnico No. 16 del OIEA[47]. Se simula una geometría semiinfinita de irradiación según recomendaciones del reporte CIRM 6 de la NPL, Las fuentes patrones fueron calibradas en Enero del 2000 en el laboratorio North Americam Scientific, Inc. que son trazables al laboratorio primario NIST. La superficie plana del detector del monitor se ubicó a 3 mm de distancia de la fuente semiinfinita simulada con el uso de la fuente patrón de 10 x 15 $cm^2$ en 9 posiciones contiguas alrededor de la posición central.

La **calibración** del monitor consiste en la emisión del factor de **calibración** CFE. Este factor que se calculará según:

$$CFE = \frac{A_S}{M_{inst} - M_f} \qquad (1.2)$$

$A_S$: valor convencionalmente verdadero de la actividad superficial en el momento de calibración,

$M_{inst}$ : es la medida de la tasa de conteo en cps o cpm.

$M_f$ : es la medida del fondo radiactivo en cps o cpm.

La incertidumbre estándar combinada de las indicaciones del instrumento se calcula mediante la suma de las contribuciones de cada uno de los elementos que conforman la ecuación del factor de **calibración**:

$$\frac{U_{CFE}^2}{CFE} = \frac{U_{AS}^2}{A_S^2} + \frac{S_{M_{inst}}^2}{(M_{inst} - M_f)^2} + \frac{U_{M_{inst}}^2}{(M_{inst} - M_f)^2} + \frac{S_{mf}^2}{(M_{inst} - M_f)^2} + \frac{U_{mf}^2}{(M_{inst} - M_f)^2} + \frac{U_S^2}{S^2} \qquad (1.3)$$

$$S_M = \sqrt{s_M^2 + u_M^2} \qquad (1.4)$$

$s_M$ es la incertidumbre estándar Tipo A de la media M de n indicaciones $M_i$ del instrumento:

$$s_M^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(\dot{M}_i - \dot{M}\right)^2}{n \cdot (n-1)} \qquad (1.5)$$

$u_M$ es la incertidumbre, tipo B, de las mediciones originadas por el efecto de la resolución de escala que se calcula de la siguiente forma:

$$u_M = \frac{a}{\sqrt{3}} \qquad (1.6)$$

donde $a$ es la resolución de la escala determinado como la mitad del intervalo definido por la escala del instrumento, o sea

$$a = \frac{(\dot{M}_{instmax} - \dot{M}_{instmin})}{2} \qquad (1.7)$$

Las incertidumbres identificadas son las siguientes: Actividad superficial de la fuente patrón, Simulación de fuente semiinfinita, la no uniformidad de detección del instrumento (minimizada por método de medición), la no homogeneidad de la fuente patrón, Dimensiones del área activa de la fuente, Posicionamiento general, el tamaño de la ventana del detector y el decaimiento de la fuente.

Para la caracterización de los instrumentos de los usuarios se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Modelos y fabricantes
- Rango de medición de la escala del instrumento y unidades de medida
- Funcionamiento y estado técnico
- Correspondencia del diseño del instrumento con el uso.
- Tipo y tamaño de los detectores
- Respuesta de los detectores para diferentes energías
- Respuestas de los detectores con la posición relativa de la fuente
- Métodos de calibración
- Principales radionucleidos que son utilizados en el país por los departamentos de medicina nuclear y otros usuarios de fuentes no selladas.
- Disponibilidad de los manuales de usuarios de los instrumentos

Estos elementos contribuyeron sin lugar a dudas de forma decisiva al diseño teórico y experimental que sirvió como base de la investigación realizada en el marco de la tesis. Los principales aportes aparecen reflejados en el capítulo III epígrafe 3.1. Este resultado fue extraído del informe técnico realizado en el proyecto ramal nuclear PRN/06-8: “Establecimiento de un servicio nacional de **calibración** de monitores de **contaminación superficial**”. Este proyecto se ejecutó en el período 2005-2007.

# CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

## 2.1 Instrumentación y equipos.

Para el desarrollo de esta tesis se emplearon cinco monitores de **contaminación superficial** con detectores de diferentes tipos y modelos. El equipamiento utilizado está detallado en las Tablas I y II de los anexos. En la tabla I aparecen los datos de los monitores y los detectores y en la tabla II las fuentes planas usadas con toda la información necesaria de datos del fabricante y los de calibración.

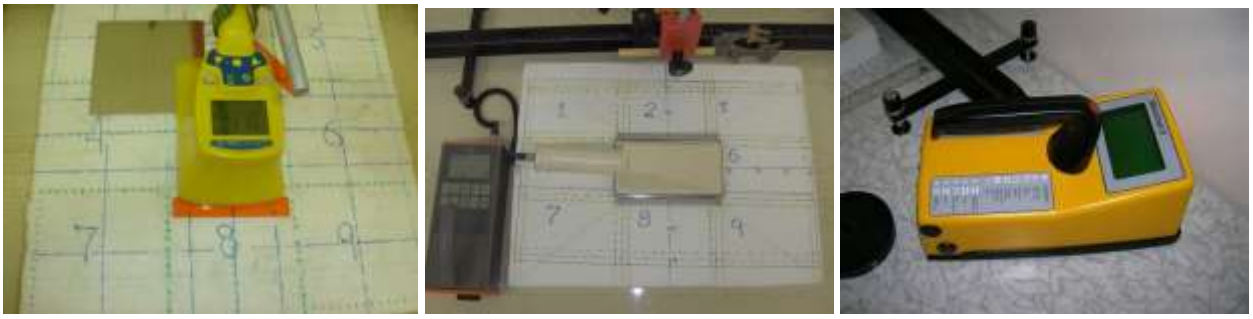


Imagen 3: Imágenes de los monitores de contaminación usados para el estudio de la metodología implementada para la **calibración** de monitores de **contaminación superficial** (Saphymo, Electa, MicroCont II, MicroCont y el PM1402-M)

Imagen 4: Imágenes de fuentes planas usados para el estudio de la metodología implementada para la **calibración** de monitores de **contaminación superficial**

## 2.2 Método de las posiciones contiguas

El método de las porciones contiguas consiste en la medida de la respuesta del detector a una fuente de calibración colocada en posiciones adyacentes debajo del monitor pero que no se superponen, hasta que toda el área del detector sea barrida (Fig. 1). Las respuestas son entonces corregidas al fondo y sumadas juntas para dar la respuesta

total esperada de una fuente de calibración de área igual al área total barrida por las posiciones individuales de la fuente.

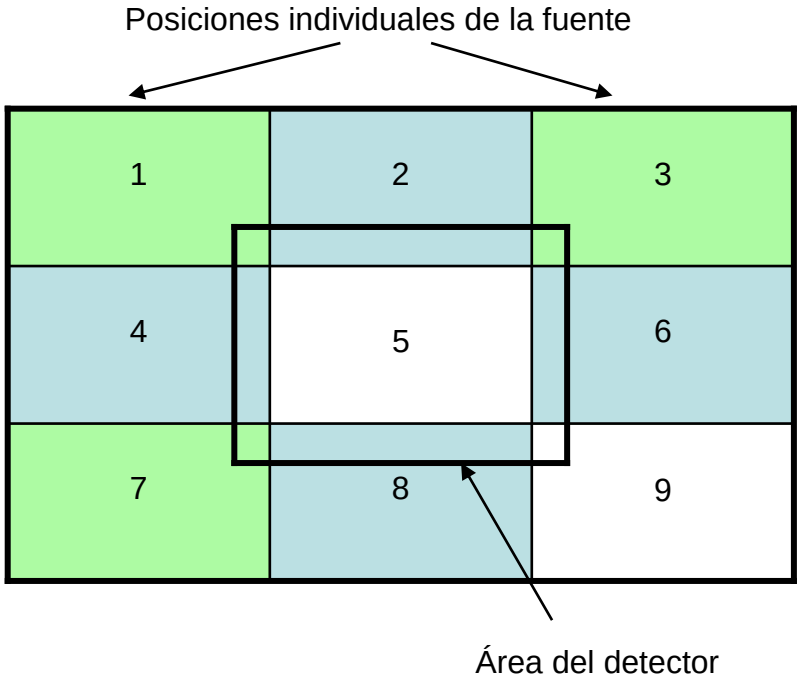



Figura 1: Representación gráfica del método de las posiciones contiguas

La eficiencia del instrumento es determinada comparando su respuesta total con la tasa de emisión superficial corregida por el decaimiento de la fuente, por unidad de área de la fuente de calibración y por el área de la ventana del detector del instrumento. Esta puede ser expresada algebraicamente como sigue:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{I=1}^{n}(B_i - B_b)}{\frac{q_{2\pi}}{w_s}.w} \qquad (2.1)$$

donde: $\varepsilon$ es la eficiencia del detector

$B_i$ es la respuesta del detector en posiciones i de la fuente ($s^{-1}$)

$B_b$ es el fondo ($s^{-1}$)

$q_{2\pi}$ es la tasa de emisión superficial ($s^{-1}$)

$W_s$ área de la fuente ($cm^{-2}$)

$W$ área del detector ($cm^{-2}$)

Esto es importante para reconocer que la eficiencia podría depender de factores característicos como: el decaimiento de los radionucleidos utilizados y de la distancia entre el detector y la fuente de calibración.

Es complicado identificar el potencial de incertidumbre de las fuentes dentro del método de las posiciones contiguas. La dirección tomada en cada etapa de esta investigación estuvo dependiente por el resultado de los estudios de las etapas previas:

- identificación de los factores que podrían afectar los resultados de una **calibración** de las posiciones contiguas
- selección de instrumentos y fuentes (representativos de aquellos usados comúnmente) para investigar los factores identificados anteriormente
- determinación de los efectos experimentales sobre las respuestas de los detectores debido a:

  uniformidad del detector
  uniformidad de la fuente

  distancia fuente-detector

  energía y tipo de radiación

  retrodispersión

  efectos en el borde de la fuente

- evaluación de los datos experimentales y estudios de campo
- evaluación práctica del mótodo de las posiciones contiguas usando una fuente de área grande

Si utilizamos el método de las posiciones contiguas usando un detector particular por primera vez, su perfil debe ser estudiado. Similarmente para una fuente de **calibración** que no ha sido utilizada, la uniformidad de la fuente debe ser determinada.

Si el perfil del detector ha sido realizado, es posible hacer las mediciones de las posiciones contiguas (tal vez para un 95%), de la respuesta total del detector obtenida

durante el perfil. Para los resultados obtenidos por las posiciones contiguas al considerar el área no estudiada, se puede aplicar un factor de corrección.

Si la fuente de calibración está siendo usada en sus contornos, el posicionamiento de la fuente debe estar delimitada por la cuadrícula para este ajuste, el área activa (en lugar del borde exterior de la fuente) debe ser adyacente y no superpuesta.

**Preparación:**

- Trazar una cuadrícula adyacente; pero que las posiciones de la fuente no se solapen (Fig.1), extendiendo en todas las direcciones más allá del área del detector escogida, determinado por el contorno del detector.
- Fijar el detector concéntricamente sobre la cuadrícula (con el centro del detector coincidiendo con el centro de la posición central de la fuente), de manera que la distancia fuente detector sea de 3 mm.

**Mediciones**

- anotar la tasa de conteo del fondo
- colocar la fuente en la primera posición sobre la cuadrícula, asegurando que esta quede dentro de los límites de la línea.
- medir la respuesta del detector rotar la fuente 90º y anotar el valor observado
  - repetir las mediciones para rotaciones de fuentes adicionales para 180º y 270º
  - Calcular el valor medio de la respuesta del detector para las cuatro orientaciones de la fuente
  - mover la fuente para la próxima posición sobre la cuadrícula, realizar mediciones en las cuatros orientaciones de la fuente y calcular el valor medio
  - Continuar las mediciones hasta que todas las posiciones sobre las cuadrículas sean estudiadas

**Análisis**

- calcular la media de la tasa de conteo del fondo medido ( $B$ )
- restar la media del fondo ( $B_b$ ), de cada media de la tasa de conteo observado ( $B_i$ ) con la fuente en cada una de las posiciones sobre la cuadrícula.

- calcular la sumatoria de la respuesta del detector corregido al fondo, $\sum(B_I - B_b)$, y aplicar un factor de corrección si es necesario
- para obtener la eficiencia del detector (conteos por segundos por emisión por unidad de área), se divide la respuesta total del detector corregida, $\sum(B_I - B_b)$, por la tasa de emisión superficial por unidad de área de la fuente de calibración tal como aparece detallado en la fórmula (2.1)

**2.3 Determinación del perfil del detector**

- Montar una sonda apropiada concéntricamente sobre la fuente del radionucleido para ser estudiada, a una separación de 3 mm del filtro en caso de ser requerido, o en otro caso, desde el plano activo de la fuente
- Fijar una regla o una escala conveniente sobre la superficie del banco de modo que coincida el origen con el centro del área activa de la fuente
- Quitar la fuente debajo del detector y medir la tasa de conteo del fondo
- Regresar la fuente al origen y registrar la respuesta del detector
- Medir la respuesta del detector a intervalos regulares 1cm en ambas direcciones del origen hasta que la respuesta observada sea consistente con la tabla de conteo del fondo
- Plotear los resultados obtenidos en una gráfica (Fig. 2). Notar que para emisores alfa la curva podría tener un plano de respuesta próximo al origen y una caída acampanada
- Calcular y plotear la respuesta del detector acumulada (la respuesta total observada contra la distancia horizontal)
- Determinar la fracción de la respuesta total para las cuales las mediciones de las posiciones contiguas podrían hacerse; esto es necesario para no realizar medidas a la distancia en la cual la respuesta del detector alcancen el fondo.
- Aplicar un factor de corrección para la respuesta total del detector para las medidas de las posiciones contiguas para tomar en cuenta dentro del cálculo el porcentaje de la respuesta del detector que no fue estudiada

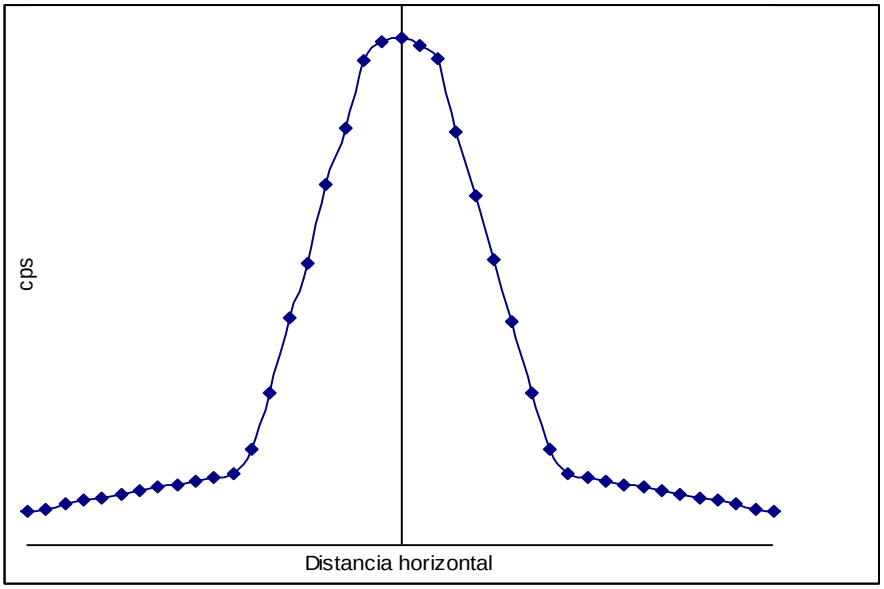



Figura 2: Gráfica característica de la tasa de conteo en función del movimiento horizontal de la fuente, para el estudio del perfil del detector

### 2.3.1 Determinación de la homogeneidad de la fuente

- Dividir la superficie del área grande de la fuente bajo estudio en iguales porciones de áreas no mayores que 10 $cm^2$ (de acuerdo a la ISO 8769)
- Determinar la tasa de conteo del fondo usando un monitor apropiado para los radionucleidos bajo examen
- Utilizar una máscara atenuadora de suficiente densidad y espesor para atenuar todas las radiaciones emitidas desde la fuente, a su vez exponer el monitor a cada una de las porciones individuales
- Determinar el valor medio de la respuesta del detector observada corregida al fondo
- Calcular el porcentaje para el cual cada porción de la fuente difiere del valor principal
- Determinar la desviación estándar en la media de la respuesta del detector, para dar la uniformidad total de la fuente

### 2.3.2 Uso del factor de corrección

El área de la cuadrícula a través de la cual se hacen las medidas de las posiciones contiguas pueden ser reducidas para adoptar una distancia medida horizontal que es un porcentaje conocido de aquel determinado durante el perfil del detector. La suma resultante de la respuesta del detector de esas medidas de las posiciones contiguas

podrían ser algún porcentaje de la respuesta total que podría ser obtenida si las mediciones hubieran sido hecha por encima del área total de la cuadrícula. Un factor de corrección puede ser aplicado para los resultados obtenidos a partir de las posiciones contiguas para considerar el área no estudiada.

Para convertir la respuesta del instrumento de conteos por segundos a Becquerel por unidad de área, debe ser aplicado un factor P,

$$Actividad = \frac{\sum_{i=1}^{n}(B_i - B_b)}{SER.P} \qquad (2.2)$$

donde $P$ es el factor apropiado.

Si la calibración se realiza utilizando la técnica de las posiciones contiguas, la prueba de laboratorio debe decir las dimensiones de la cuadrícula usada en el certificado, de modo que los resultados previos y posteriores a las calibraciones puedan ser comparados. Para reducir el número de mediciones incluidas en una **calibración** de las posiciones contiguas, es posible conocer un porcentaje de la distancia radial que ha sido identificada en el perfil del detector. Si las medidas son realizadas por ejemplo para un 95 % de esa distancia, un factor de corrección puede ser aplicado para compensar los resultados para las áreas no cubiertas.

### 2.4 Cálculo de la incertidumbre expandida

El método usado en este trabajo para la estimación de la incertidumbre referente a los resultados de las mediciones es la recomendación INC-1 [91], del Buró Internacional de Medidas y Pesas (BIPM), aprobado por el Comité internacional de Medidas y Pesas (CIPM) en 1981. La tarea de desarrollar una guía detallada basada sobre esta aproximación unificada fue transferida a la ISO in 1986. La emisión de este resultado, en 1993, del documento ISO titulado “Guide to the expresión of uncertainty in Measurement” [92], que debe ser consultado para más detalle. Este trabajo aparece resumido el apéndice A del Technical Reports Series No. 277 [47] y del IAEA Technical Reports Series No.16. [46]

## 2.5 Incertidumbre estándar de tipo A

Las incertidumbres del tipo A identificadas el este proceso de calibración son:

1. La medida de la tasa de conteo del instrumento $B_i$
2. La medida del fondo del instrumento $B_b$.

Ambas, son estimadas como la menor división de la escala del instrumento.

## 2.6 Incertidumbre estándar de tipo B

Las incertidumbres del tipo B identificadas son las siguientes:

1. Actividad superficial de la fuente patrón
2. Simulación de fuente semiinfinita (bordes)
3. No uniformidad de detección del instrumento (minimizada por método de medición)
4. La no homogeneidad de la fuente patrón (caso extremo 6 % según NPL report CIRM 6)
5. Dimensiones del área activa de la fuente (6 % en caso extremo según NPL report CIRM 6)
6. Posicionamiento general (según NPL report CIRM 6).

Otras fuentes identificadas son el tamaño de la ventana del detector y el decaimiento de la fuente.

Para calcular la incertidumbre expandida de la eficiencia, para un 95% de confianza, se deberá multiplicar la incertidumbre combinada U($\varepsilon$) obtenida con la expresión (2.1) por un factor de cobertura k = 2.0, asumiendo una distribución normal de $\varepsilon$.

Luego, la incertidumbre expandida puede expresarse como:

$$U_{\varepsilon}^{2} = S_{\varepsilon}^{2} + u_{\varepsilon}^{2} \qquad (2.3)$$

donde,

$S_{\varepsilon}$: Incertidumbre del tipo A

$u_{\varepsilon}$: Incertidumbre del tipo B

$U_{\varepsilon}$ Incertidumbre expandida

Desglosando las contribuciones de cada tipo de incertidumbre se obtiene que:

$$\frac{U^2(\varepsilon)}{(\varepsilon)^2} = \frac{U^2{}_B(B)}{(B-B_b)^2} + \frac{U^2(B_b)}{(B-B_b)^2} + \frac{U^2(q_{2\pi})}{(q_{2\pi})^2} + \frac{U^2(w)}{(w)^2} + \frac{U^2(w_s)}{(w_s)} \qquad (2.4)$$

donde los dos primeros términos de la ecuación (2.4) son las incertidumbres asociadas a los procesos de medición de la tasa de conteo y al fondo, el tercero y cuarto término son las contribuciones de la activad de la fuente por unidad de área y el último término la incertidumbre aportada por el área del detector.

Luego la incertidumbre asociada al proceso de medición de la tasa de conteo neta puede ser expresada como:

$$U^2(B_b) = S^2{}_{B_b} + u^2{}_{B_b} \qquad (2.5)$$

La incertidumbre asociada a la tasa de emisión superficial de la fuente puede interpretarse como la suma de las incertidumbres de la actividad superficial y del decaimiento de la fuente.

$$U^2(q_{2\pi}) = U^2(q_0) + u^2{}_{kdec} \qquad (2.6)$$

donde:

$U^2(q_0)$: es la incertidumbre asociada a la actividad superficial de la fuente (certificado de calibración de la fuente)

$u^2{}_{kdec}$: incertidumbre producida por el decaimiento de la fuente

La incertidumbre asociada al área sensible de la ventana, posicionamiento y uniformidad del detector es como sigue:

$$U^2(w) = u^2(w)_{fab.} + u^2(w)_{posic.} + u^2(w)_{unif.} \qquad (2.7)$$

La incertidumbre asociada al área activa de la fuente, posicionamiento y uniformidad es como sigue:

$$\frac{U^2(w_s)}{(w_s)} = u^2(w_s)_{fab.} + u^2(w_s)_{posic.} + u^2(w_s)_{unif.} \qquad (2.8)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.5; 2.6; 2.7 y 2.8 en 2.4 se obtienen las fuentes de incertidumbres que más aportan al proceso de **calibración**:

$$\frac{U^2(\varepsilon)}{(\varepsilon)^2} = S^2{}_{B_b} + u^2{}_{B_b} + U^2(q_0) + u^2{}_{kdec} + u^2(w)_{fab.} + u^2(w)_{posic.} + u^2(w)_{unif.} + u^2(w_s)_{fab.} + u^2(w_s)_{posic.} + u^2(w_s)_{unif.} \qquad (2.9)$$

Estas fuentes de incertidumbres identificadas son las que más contribuyen a este proceso. Dentro estas hay algunas muy pequeñas como la producida por el decaimiento de la fuente que puede despreciarse y la otra, la no uniformidad de detección del instrumento que es minimizada por el método de medición.

# CAPÍTULO III Resultados y Discusión.

## 3.1 Resultados de la caracterización de los monitores de contaminación superficial en Cuba a través de un ensayo piloto

Los principales resultados alcanzados en el ensayo piloto fueron los siguientes:

- Existe una gran variedad de modelos de monitores de contaminación (al menos de 17 fabricantes distintos) aproximadamente el 70 % del total.
- El rango de medición oscila entre (0 - 1000) cps para el 23% de la muestra, entre (0 - 2000) para el 33% de la muestra y hasta 10 000 cps para el resto de la muestra.
- Existe una gran variedad de tipo de detectores tales como:
  - Contadores proporcionales sellados llenos de xenón
  - Contadores proporcionales de flujo gaseoso
  - Contadores proporcionales de flujo gaseoso sin ventana
  - Contadores Geiger-Muller
  - Detectores de centelleo
  - Detectores de semiconductor.
- Tamaño de la ventana de los detectores muestreados oscila entre (5 – 50) $cm^2$ para el 32 % de la muestra, entre (50 – 100) $cm^2$ para el 28 % y el resto de la muestra hasta 232 $cm^2$.
- Los instrumentos tienen como promedio 10 años de explotación y en algunos casos el coeficiente de variación es muy alto y los potenciómetros no permiten hacerles ajustes electrónicos. Por otra parte algunos monitores de escala digital, tienen dígitos casi ilegibles.
- Se identificaron instrumentos que nunca habían sido calibrados y solo contaban con algunas pruebas hechas por el fabricante. Otros monitores tienen los certificados cuya fecha de emisión pasan de 5 ó más años.
- El 25 % de los usuarios tienen instrumentos que la sensibilidad de detección no se corresponde con el uso que se les da.
- Se corroboró que las respuestas de los detectores varían con la actividad de la fuente, con la posición relativa fuente – detector y con el tipo de radionucleido.
- Se identificaron 14 tipos de radionucleidos que se utilizan en el país que clasifican dentro de las fuentes no selladas.

- Debido a la variedad de las dimensiones de las ventanas de los detectores, es necesario al menos dos métodos de calibración o uno que lo incluya todos.
- Algunos usuarios no tienen manuales de sus monitores.

La **calibración** de los instrumentos de medición de contaminaciones superficiales para el ensayo piloto se realizó utilizando el método de una fuente para cada radionucleido. Por lo que se deduce que con las cuatro fuentes con que contaba el LSCD no podía cubrir las necesidades de los usuarios, es decir, necesitaba una fuente para cada radionucleido identificado.

Este método demanda contar con un número significativo de fuentes de referencia, al menos una para cada radionucleido de interés. Esto se hace más crítico si se considera que un número importante de estos radionucleidos presenta cortos período de semi-desintegración radiactiva. Esta dificultad hace insostenible este método de calibración, por lo que se hizo necesario la búsqueda de un método más eficiente y menos costoso: el método de la **calibración** con varias fuentes.

Esta calibración se realizada en términos de eficiencia del instrumento de medición para los tipos de radiaciones, grupos de energías y se ofrece como un método más versátil que permite obtener en cualquier momento el factor de **calibración** para el elemento radiactivo que se requiera.

## 3.2 Resultados obtenidos de los perfiles de los detectores

Los resultados de las investigaciones de los perfiles de los detectores están contenidos en las tablas de la (1-12). Las gráficas correspondientes a estos gráficos pueden ser encontradas en las figuras de la 5 a 22. Los perfiles fueron determinados para una distancia fuente detector de 3 mm.

**Emisores alfa**

El perfil de los detectores obtenidos para los emisores alfa (Figuras 5 - 7), se observa que la respuesta de los detectores en función del desplazamiento horizontal de la fuente forma una meseta casi paralela y luego se produce una caída dramática de la tasa de conteo en la medida en que la fuente se separa del detector. Cuando el borde del área activa de la fuente coincide con el del detector, la tasa de conteo alcanza el orden del fondo. Este tipo de respuesta es característico de los emisores alfa debido al poco alcance que tienen las partículas emitidas en el aire.

Por otra parte es importante destacar la simetría representada en las figuras antes mencionadas, solo en el caso de la fuente $^{241}$Am(886) en los perfiles: horizontal corto, diagonal derecho y diagonal izquierdo se observa un poco de asimetría en una u otra dirección que puede estar asociada con el posicionamiento fuente detector.

**Emisores beta**

El perfil de los detectores obtenidos para los emisores beta (Figuras 8- 14), se observa que la respuesta de los detectores en función del desplazamiento horizontal de la fuente en el perfil horizontal largo forma una meseta casi paralela y posteriormente ocurre algo similar a los emisores alfa, es decir, se produce la caída drástica de la tasa de conteo. La campana o área bajo la curva de este perfil es algo mayor que el resto de los tres perfiles para una misma fuente. Lo que implica que la tasa de conteo en este perfil también es mayor y por lo tanto se alcanza el fondo a una distancia mayor que el resto de los perfiles. Algunas asimetrías observadas tienen que ver probablemente con el posicionamiento de la fuente y el detector. Las observaciones hechas anteriormente se comportan de la misma manera para todos los detectores con sus respectivas fuentes.

**Emisores gamma**

El perfil de los detectores, obtenidos para los emisores gamma se puede observar las siguientes figuras (15 – 22). La campana o área bajo la curva del perfil horizontal largo es algo mayor que el resto de los tres perfiles para una misma fuente, al igual que en los emisores alfa y beta, con la diferencia que el fondo se alcanza a una distancia mucho mayor. Lo que implica que la tasa de conteo en este perfil también es mayor y por lo tanto se alcanza el fondo a una distancia mayor que el resto de los perfiles. Algunas asimetrías observadas tienen que ver también probablemente con el posicionamiento de la fuente y el detector. Las observaciones hechas anteriormente se comportan de la misma manera para todos los detectores con sus respectivas fuentes. Es importante destacar la diferencia de respuesta de los detectores dentro de los propios emisores gamma. La menor tasa de conteo la tuvo la fuente de $^{137}$Cs/889, el más energético y la mayor la obtuvo la fuente $^{241}$Am/887 el de menor energía. Este hecho demuestra la dependencia de la tasa de conteo con la energía de los radionucleidos y que estos detectores tienen una mejor respuesta para aquellos radionucleidos de más baja energía.

**Tabla 3**
Perfil del detector GP13A/ $^{14}C$/892(beta)

Horizontal largo

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}s$) |
|---|---|
| -20 | 56,4 |
| -19 | 57,2 |
| -18 | 58,2 |
| -17 | 55,9 |
| -16 | 55,8 |
| -15 | 55,4 |
| -14 | 54,9 |
| -13 | 55,5 |
| -12 | 61,9 |
| -11 | 70,7 |
| -10 | 85,2 |
| -9 | 102 |
| -8 | 109 |
| -7 | 132 |
| -6 | 140 |
| -5 | 149 |
| -4 | 164 |
| -3 | 173 |
| -2 | 181 |
| -1 | 185 |
| 0 | 184 |
| 1 | 184 |
| 2 | 181 |
| 3 | 174 |
| 4 | 165 |
| 5 | 156 |
| 6 | 140 |
| 7 | 131 |
| 8 | 119 |
| 9 | 95,5 |
| 10 | 85,7 |
| 11 | 72,4 |
| 12 | 62,7 |
| 13 | 54,3 |
| 14 | 56,1 |
| 15 | 54,8 |
| 16 | 55,7 |
| 17 | 53,9 |
| 18 | 54,8 |
| 19 | 54,7 |
| 20 | 53,2 |

Horizontal Corto

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}s$) |
|---|---|
| -20 | 54,5 |
| -19 | 55,9 |
| -18 | 53,2 |
| -17 | 53,0 |
| -16 | 56,5 |
| -15 | 53,5 |
| -14 | 55,5 |
| -13 | 52,5 |
| -12 | 52,2 |
| -11 | 54,6 |
| -10 | 56,1 |
| -9 | 55,9 |
| -8 | 59,7 |
| -7 | 78,5 |
| -6 | 95,7 |
| -5 | 119 |
| -4 | 142 |
| -3 | 161 |
| -2 | 179 |
| -1 | 184 |
| 0 | 184 |
| 1 | 181 |
| 2 | 173 |
| 3 | 148 |
| 4 | 137 |
| 5 | 114 |
| 6 | 101 |
| 7 | 78,3 |
| 8 | 59,7 |
| 9 | 57,2 |
| 10 | 56,2 |
| 11 | 53,5 |
| 12 | 52,9 |
| 13 | 53,1 |
| 14 | 53,8 |
| 15 | 54,9 |
| 16 | 54,9 |
| 17 | 51,7 |
| 18 | 54,7 |
| 19 | 54,6 |
| 20 | 54,5 |

Diagonal derecha

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}s$) |
|---|---|
| -20 | 59,7 |
| -19 | 56,4 |
| -18 | 61,4 |
| -17 | 61,1 |
| -16 | 57,3 |
| -15 | 57,2 |
| -14 | 57,8 |
| -13 | 57,3 |
| -12 | 59,0 |
| -11 | 56,8 |
| -10 | 54,9 |
| -9 | 57,1 |
| -8 | 61,0 |
| -7 | 69,0 |
| -6 | 81,6 |
| -5 | 94,3 |
| -4 | 108 |
| -3 | 133 |
| -2 | 158 |
| -1 | 179 |
| 0 | 189 |
| 1 | 192 |
| 2 | 187 |
| 3 | 168 |
| 4 | 143 |
| 5 | 117 |
| 6 | 97,0 |
| 7 | 79,6 |
| 8 | 67,8 |
| 9 | 58,2 |
| 10 | 56,1 |
| 11 | 57,6 |
| 12 | 57,8 |
| 13 | 56,7 |
| 14 | 59,1 |
| 15 | 58,3 |
| 16 | 53,8 |
| 17 | 55,2 |
| 18 | 55,3 |
| 19 | 57,8 |
| 20 | 54,7 |

Diagonal izquierda

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}s$) |
|---|---|
| -20 | 53,7 |
| -19 | 53,7 |
| -18 | 53,9 |
| -17 | 55,0 |
| -16 | 53,3 |
| -15 | 54,4 |
| -14 | 54,0 |
| -13 | 57,0 |
| -12 | 56,7 |
| -11 | 57,2 |
| -10 | 54,8 |
| -9 | 55,6 |
| -8 | 59,3 |
| -7 | 72,4 |
| -6 | 84,8 |
| -5 | 104 |
| -4 | 130 |
| -3 | 163 |
| -2 | 179 |
| -1 | 188 |
| 0 | 191 |
| 1 | 186 |
| 2 | 174 |
| 3 | 141 |
| 4 | 122 |
| 5 | 101 |
| 6 | 82,1 |
| 7 | 70,2 |
| 8 | 58,8 |
| 9 | 55,0 |
| 10 | 57,1 |
| 11 | 57,5 |
| 12 | 58,1 |
| 13 | 57,0 |
| 14 | 55,8 |
| 15 | 55,6 |
| 16 | 56,0 |
| 17 | 55,1 |
| 18 | 53,5 |
| 19 | 55,2 |
| 20 | 53,7 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

**Tabla 4**

Perfil del detector GP13A/ $^{241}$Am/886 (alfa)

Horizontal largo

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -16 | 2,6 |
| -15 | 2,1 |
| -14 | 2,9 |
| -13 | 3,0 |
| -12 | 19,7 |
| -11 | 47,9 |
| -10 | 91,1 |
| -9 | 115 |
| -8 | 148 |
| -7 | 172 |
| -6 | 210 |
| -5 | 239 |
| -4 | 275 |
| -3 | 306 |
| -2 | 318 |
| -1 | 317 |
| 0 | 318 |
| 1 | 317 |
| 2 | 316 |
| 3 | 302 |
| 4 | 277 |
| 5 | 240 |
| 6 | 213 |
| 7 | 183 |
| 8 | 150 |
| 9 | 114 |
| 10 | 86,9 |
| 11 | 50,8 |
| 12 | 20,7 |
| 13 | 3,0 |
| 14 | 2,8 |
| 15 | 2,1 |
| 16 | 2,6 |

Horizontal Corto

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 3,4 |
| -14 | 2,8 |
| -13 | 2,9 |
| -12 | 2,8 |
| -11 | 3,0 |
| -10 | 16,4 |
| -9 | 60,4 |
| -8 | 108 |
| -7 | 153 |
| -6 | 204 |
| -5 | 250 |
| -4 | 297 |
| -3 | 315 |
| -2 | 318 |
| -1 | 332 |
| 0 | 312 |
| 1 | 280 |
| 2 | 232 |
| 3 | 183 |
| 4 | 129 |
| 5 | 77,5 |
| 6 | 23,5 |
| 7 | 3,2 |
| 8 | 3,0 |
| 9 | 3,2 |
| 10 | 2,5 |
| 11 | 3,0 |
| 12 | 2,8 |
| 13 | 3,3 |
| 14 | 3,4 |
| 15 | 2,8 |

Diagonal derecha

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 2,3 |
| -14 | 2,3 |
| -13 | 2,4 |
| -12 | 2,0 |
| -11 | 2,1 |
| -10 | 2,3 |
| -9 | 2,3 |
| -8 | 10,8 |
| -7 | 35,5 |
| -6 | 76,0 |
| -5 | 127 |
| -4 | 173 |
| -3 | 232 |
| -2 | 294 |
| -1 | 312 |
| 0 | 317 |
| 1 | 330 |
| 2 | 315 |
| 3 | 258 |
| 4 | 195 |
| 5 | 133 |
| 6 | 82,8 |
| 7 | 41,4 |
| 8 | 8,6 |
| 9 | 2,4 |
| 10 | 2,5 |
| 11 | 2,4 |
| 12 | 2,2 |
| 13 | 2,7 |
| 14 | 2,5 |
| 15 | 2,9 |

Diagonal izquierda

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 2,31 |
| -14 | 2,41 |
| -13 | 2,29 |
| -12 | 2,88 |
| -11 | 2,00 |
| -10 | 1,96 |
| -9 | 2,37 |
| -8 | 7,17 |
| -7 | 37,6 |
| -6 | 87,7 |
| -5 | 138 |
| -4 | 202 |
| -3 | 267 |
| -2 | 324 |
| -1 | 330 |
| 0 | 324 |
| 1 | 323 |
| 2 | 288 |
| 3 | 224 |
| 4 | 166 |
| 5 | 112 |
| 6 | 65,2 |
| 7 | 30,9 |
| 8 | 6,63 |
| 9 | 2,41 |
| 10 | 2,19 |
| 11 | 2,01 |
| 12 | 2,40 |
| 13 | 2,42 |
| 14 | 2,51 |
| 15 | 2,31 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

**Tabla 5**

Perfil del detector GP13A/ $^{241}$Sr/J289 (beta)

Horizontal largo

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 52,9 |
| -14 | 51,9 |
| -13 | 52,0 |
| -12 | 50,8 |
| -11 | 53,2 |
| -10 | 52,4 |
| -9 | 52,0 |
| -8 | 64,9 |
| -7 | 89,4 |
| -6 | 98,2 |
| -5 | 122 |
| -4 | 134 |
| -3 | 160 |
| -2 | 167 |
| -1 | 172 |
| 0 | 172 |
| 1 | 175 |
| 2 | 163 |
| 3 | 159 |
| 4 | 140 |
| 5 | 119 |
| 6 | 94,6 |
| 7 | 80,0 |
| 8 | 63,4 |
| 9 | 56,1 |
| 10 | 50,6 |
| 11 | 53,8 |
| 12 | 55,1 |
| 13 | 54,0 |
| 14 | 54,1 |
| 15 | 53,6 |

Horizontal Corto

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -20 | 53,0 |
| -19 | 52,3 |
| -18 | 56,1 |
| -17 | 55,6 |
| -16 | 54,8 |
| -15 | 55,0 |
| -14 | 62,0 |
| -13 | 73,9 |
| -12 | 76,1 |
| -11 | 89,7 |
| -10 | 97,4 |
| -9 | 102 |
| -8 | 114 |
| -7 | 126 |
| -6 | 132 |
| -5 | 138 |
| -4 | 145 |
| -3 | 147 |
| -2 | 160 |
| -1 | 170 |
| 0 | 172 |
| 1 | 169 |
| 2 | 160 |
| 3 | 148 |
| 4 | 146 |
| 5 | 139 |
| 6 | 123 |
| 7 | 117 |
| 8 | 107 |
| 9 | 103 |
| 10 | 93,6 |
| 11 | 85,9 |
| 12 | 78,5 |
| 13 | 73,9 |
| 14 | 63,3 |
| 15 | 62,0 |
| 16 | 54,6 |
| 17 | 52,2 |
| 18 | 53,5 |
| 19 | 52,9 |
| 20 | 54,0 |

Diagonal derecha

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 54,1 |
| -14 | 55,6 |
| -13 | 54,2 |
| -12 | 52,4 |
| -11 | 53,0 |
| -10 | 54,1 |
| -9 | 55,3 |
| -8 | 58,8 |
| -7 | 71,2 |
| -6 | 80,5 |
| -5 | 102 |
| -4 | 118 |
| -3 | 135 |
| -2 | 156 |
| -1 | 173 |
| 0 | 174 |
| 1 | 169 |
| 2 | 156 |
| 3 | 131 |
| 4 | 113 |
| 5 | 94,3 |
| 6 | 76,9 |
| 7 | 65,2 |
| 8 | 55,9 |
| 9 | 54,5 |
| 10 | 54,7 |
| 11 | 56,3 |
| 12 | 53,3 |
| 13 | 53,2 |
| 14 | 55,7 |
| 15 | 54,7 |

Diagonal izquierda

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 54,5 |
| -14 | 54,9 |
| -13 | 54,5 |
| -12 | 55,4 |
| -11 | 53,2 |
| -10 | 54,0 |
| -9 | 54,9 |
| -8 | 56,2 |
| -7 | 66,9 |
| -6 | 80,5 |
| -5 | 95,0 |
| -4 | 115 |
| -3 | 137 |
| -2 | 156 |
| -1 | 171 |
| 0 | 174 |
| 1 | 170 |
| 2 | 154 |
| 3 | 135 |
| 4 | 118 |
| 5 | 97 |
| 6 | 80,8 |
| 7 | 68,6 |
| 8 | 56,1 |
| 9 | 54,4 |
| 10 | 54,6 |
| 11 | 54,2 |
| 12 | 54,9 |
| 13 | 53,6 |
| 14 | 55,3 |
| 15 | 53,1 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

**Tabla 6**

Perfil del detector GP13A/ $^{36}$Cl/J290 (beta)

Horizontal largo

| Distancia desde el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -20 | 53,9 |
| -19 | 52,6 |
| -18 | 53,8 |
| -17 | 54,4 |
| -16 | 54,1 |
| -15 | 56,9 |
| -14 | 59,6 |
| -13 | 64,3 |
| -12 | 70,4 |
| -11 | 74,3 |
| -10 | 80,1 |
| -9 | 84,9 |
| -8 | 87,9 |
| -7 | 93,7 |
| -6 | 98,7 |
| -5 | 105 |
| -4 | 110 |
| -3 | 117 |
| -2 | 122 |
| -1 | 129 |
| 0 | 132 |
| 1 | 130 |
| 2 | 121 |
| 3 | 116 |
| 4 | 109 |
| 5 | 105 |
| 6 | 96,8 |
| 7 | 90,0 |
| 8 | 87,9 |
| 9 | 86,7 |
| 10 | 80,3 |
| 11 | 75,7 |
| 12 | 70,3 |
| 13 | 64,7 |
| 14 | 57,9 |
| 15 | 56,2 |
| 16 | 54,0 |
| 17 | 54,1 |
| 18 | 53,1 |
| 19 | 51,2 |
| 20 | 53,9 |

Horizontal Corto

| Distancia desde el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 51,1 |
| -14 | 51,6 |
| -13 | 51,3 |
| -12 | 51,8 |
| -11 | 53,5 |
| -10 | 54,5 |
| -9 | 54,1 |
| -8 | 57,8 |
| -7 | 68,7 |
| -6 | 83,2 |
| -5 | 92,3 |
| -4 | 108 |
| -3 | 116 |
| -2 | 126 |
| -1 | 128 |
| 0 | 132 |
| 1 | 130 |
| 2 | 126 |
| 3 | 117 |
| 4 | 108 |
| 5 | 93,0 |
| 6 | 82,7 |
| 7 | 69,2 |
| 8 | 56,2 |
| 9 | 53,3 |
| 10 | 54,0 |
| 11 | 55,0 |
| 12 | 52,0 |
| 13 | 51,5 |
| 14 | 51,5 |
| 15 | 51,2 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

## Tabla 7

Perfil del detector GP13A/ $^{241}$Am/887 (gamma)

Horizontal largo

| Distancia de el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -18 | 53,4 |
| -17 | 53,4 |
| -16 | 53,4 |
| -15 | 53,4 |
| -14 | 56,4 |
| -13 | 56,9 |
| -12 | 61,7 |
| -11 | 64,3 |
| -10 | 67,3 |
| -9 | 70,7 |
| -8 | 72,7 |
| -7 | 75,0 |
| -6 | 77,6 |
| -5 | 83,5 |
| -4 | 84,2 |
| -3 | 88,6 |
| -2 | 91,1 |
| -1 | 95,2 |
| 0 | 96,9 |
| 1 | 94,9 |
| 2 | 90,1 |
| 3 | 87,4 |
| 4 | 83,6 |
| 5 | 82,6 |
| 6 | 74,9 |
| 7 | 71,7 |
| 8 | 71,2 |
| 9 | 68,5 |
| 10 | 66,8 |
| 11 | 63,7 |
| 12 | 59,6 |
| 13 | 57,3 |
| 14 | 54,6 |
| 15 | 52,6 |
| 16 | 52,6 |
| 17 | 52,6 |
| 18 | 52,6 |

Horizontal Corto

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 52,5 |
| -14 | 53,6 |
| -13 | 53,3 |
| -12 | 53,8 |
| -11 | 54,9 |
| -10 | 55,1 |
| -9 | 54,9 |
| -8 | 58,7 |
| -7 | 59,5 |
| -6 | 69,5 |
| -5 | 79,2 |
| -4 | 84,0 |
| -3 | 90,5 |
| -2 | 94,2 |
| -1 | 95,5 |
| 0 | 96,9 |
| 1 | 95,1 |
| 2 | 92,5 |
| 3 | 89,7 |
| 4 | 82,3 |
| 5 | 77,2 |
| 6 | 70,5 |
| 7 | 60,8 |
| 8 | 59,8 |
| 9 | 55,0 |
| 10 | 54,5 |
| 11 | 54,4 |
| 12 | 51,6 |
| 13 | 52,0 |
| 14 | 53,5 |
| 15 | 52,0 |

Diagonal derecha

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 2,69 |
| -14 | 2,74 |
| -13 | 2,66 |
| -12 | 2,56 |
| -11 | 2,78 |
| -10 | 2,96 |
| -9 | 3,48 |
| -8 | 4,92 |
| -7 | 10,7 |
| -6 | 16,2 |
| -5 | 22,3 |
| -4 | 27,4 |
| -3 | 32,1 |
| -2 | 34,8 |
| -1 | 35,9 |
| 0 | 38,3 |
| 1 | 35,1 |
| 2 | 34,6 |
| 3 | 29,9 |
| 4 | 21,1 |
| 5 | 18,6 |
| 6 | 15,0 |
| 7 | 10,5 |
| 8 | 5,29 |
| 9 | 3,78 |
| 10 | 2,69 |
| 11 | 2,67 |
| 12 | 2,46 |
| 13 | 2,49 |
| 14 | 2,47 |
| 15 | 2,30 |

Diagonal izquierda

| Distancia desde origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -18 | 3,15 |
| -17 | 3,24 |
| -16 | 3,33 |
| -15 | 3,31 |
| -14 | 4,61 |
| -13 | 6,23 |
| -12 | 9,23 |
| -11 | 13,5 |
| -10 | 14,6 |
| -9 | 17,7 |
| -8 | 19,7 |
| -7 | 22,2 |
| -6 | 24,2 |
| -5 | 25,0 |
| -4 | 28,7 |
| -3 | 30,0 |
| -2 | 32,7 |
| -1 | 34,7 |
| 0 | 38,3 |
| 1 | 34,5 |
| 2 | 32,5 |
| 3 | 29,3 |
| 4 | 25,8 |
| 5 | 23,0 |
| 6 | 22,2 |
| 7 | 17,8 |
| 8 | 15,9 |
| 9 | 14,0 |
| 10 | 12,3 |
| 11 | 9,38 |
| 12 | 8,00 |
| 13 | 4,78 |
| 14 | 3,58 |
| 15 | 2,80 |
| 16 | 2,80 |
| 17 | 2,81 |
| 18 | 2,81 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

## Tabla 8

Perfil del detector GP13A/ $^{241}$Am/887 (gamma)

Horizontal largo

| Distancia de el origen en (cm) | [1]Valor medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -40 | 53,7 |
| -35 | 54,3 |
| -34 | 55,2 |
| -33 | 57,8 |
| -32 | 55,8 |
| -31 | 56,9 |
| -30 | 56,5 |
| -29 | 57,2 |
| -28 | 58,3 |
| -27 | 57,6 |
| -26 | 63,2 |
| -25 | 61,8 |
| -24 | 60,8 |
| -23 | 61,2 |
| -22 | 62,4 |
| -21 | 66,3 |
| -20 | 67,4 |
| -19 | 67,0 |
| -18 | 70,3 |
| -17 | 71,4 |
| -16 | 75,6 |
| -15 | 76,0 |
| -14 | 76,7 |
| -13 | 79,5 |
| -12 | 199 |
| -11 | 398 |
| -10 | 636 |
| -9 | 844 |
| -8 | 1052 |
| -7 | 1279 |
| -6 | 1534 |
| -5 | 1707 |
| -4 | 1948 |
| -3 | 2046 |
| -2 | 2285 |
| -1 | 2330 |
| 0 | 2338 |

| | |
|---|---|
| 1 | 2325 |
| 2 | 2286 |
| 3 | 2146 |
| 4 | 1920 |
| 5 | 1667 |
| 6 | 1454 |
| 7 | 1220 |
| 8 | 987 |
| 9 | 775 |
| 10 | 577 |
| 11 | 349 |
| 12 | 168 |
| 13 | 82,5 |
| 14 | 73,3 |
| 15 | 72,9 |
| 16 | 72,2 |
| 17 | 70,0 |
| 18 | 71,2 |
| 19 | 65,0 |
| 20 | 63,6 |
| 21 | 60,9 |
| 22 | 62,8 |
| 23 | 62,3 |
| 24 | 60,9 |
| 25 | 59,0 |
| 26 | 60,0 |
| 27 | 58,3 |
| 28 | 60,7 |
| 29 | 59,6 |
| 30 | 57,5 |
| 31 | 56,8 |
| 32 | 57,8 |
| 33 | 44,7 |
| 34 | 55,7 |
| 35 | 56,6 |
| 40 | 55,4 |

Horizontal largo

| Distancia de el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -40 | 59,5 |
| -35 | 60,5 |
| -34 | 60,8 |
| -33 | 57,3 |
| -32 | 59,9 |
| -31 | 61,4 |
| -30 | 60,4 |
| -29 | 61,5 |
| -28 | 61,8 |
| -27 | 61,9 |
| -26 | 63,3 |
| -25 | 63,7 |
| -24 | 65,7 |
| -23 | 66,2 |
| -22 | 67,8 |
| -21 | 66,7 |
| -20 | 72,5 |
| -19 | 73,4 |
| -18 | 71,9 |
| -17 | 72,4 |
| -16 | 74,5 |
| -15 | 77,8 |
| -14 | 82,0 |
| -13 | 81,2 |
| -12 | 88,6 |
| -11 | 89,4 |
| -10 | 89,7 |
| -9 | 98,5 |
| -8 | 227 |
| -7 | 519 |
| -6 | 862 |
| -5 | 1203 |
| -4 | 1545 |
| -3 | 1898 |
| -2 | 2204 |
| -1 | 2331 |
| 0 | 2338 |

| | |
|---|---|
| 1 | 2337 |
| 2 | 2203 |
| 3 | 1994 |
| 4 | 1553 |
| 5 | 1202 |
| 6 | 856 |
| 7 | 514 |
| 8 | 228 |
| 9 | 101 |
| 10 | 89,0 |
| 11 | 88,8 |
| 12 | 87,5 |
| 13 | 82,5 |
| 14 | 81,0 |
| 15 | 77,8 |
| 16 | 75,2 |
| 17 | 71,6 |
| 18 | 70,4 |
| 19 | 70,8 |
| 20 | 69,8 |
| 21 | 66,7 |
| 22 | 66,8 |
| 23 | 65,5 |
| 24 | 65,1 |
| 25 | 63,8 |
| 26 | 63,3 |
| 27 | 62,4 |
| 28 | 62,2 |
| 29 | 61,3 |
| 30 | 61,3 |
| 31 | 57,7 |
| 32 | 58,7 |
| 33 | 56,9 |
| 34 | 60,5 |
| 35 | 56,7 |
| 40 | 60,9 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

## Tabla 9

Perfil del detector GP13A/ $^{57}$Co/890 (gamma)

Horizontal largo

| Distancia de el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -50 | 68,4 |
| -45 | 68,5 |
| -40 | 78,2 |
| -35 | 79,7 |
| -34 | 81,6 |
| -33 | 82,6 |
| -32 | 83,9 |
| -31 | 66,4 |
| -30 | 92,3 |
| -29 | 96,7 |
| -28 | 98,8 |
| -27 | 101 |
| -26 | 104 |
| -25 | 108 |
| -24 | 119 |
| -23 | 125 |
| -22 | 131 |
| -21 | 139 |
| -20 | 149 |
| -19 | 168 |
| -18 | 176 |
| -17 | 196 |
| -16 | 215 |
| -15 | 255 |
| -14 | 302 |
| -13 | 456 |
| -12 | 808 |
| -11 | 1470 |
| -10 | 2206 |
| -9 | 3056 |
| -8 | 3889 |
| -7 | 4683 |
| -6 | 5469 |
| -5 | 6273 |
| -4 | 7029 |
| -3 | 7692 |
| -2 | 8069 |
| -1 | 8225 |
| 0 | 8245 |

| | |
|---|---|
| 1 | 8184 |
| 2 | 7606 |
| 3 | 7459 |
| 4 | 6789 |
| 5 | 6013 |
| 6 | 5283 |
| 7 | 4438 |
| 8 | 3669 |
| 9 | 2840 |
| 10 | 2130 |
| 11 | 1408 |
| 12 | 780 |
| 13 | 449 |
| 14 | 299 |
| 15 | 238 |
| 16 | 200 |
| 17 | 178 |
| 18 | 166 |
| 19 | 152 |
| 20 | 140 |
| 21 | 129 |
| 22 | 126 |
| 23 | 118 |
| 24 | 110 |
| 25 | 105 |
| 26 | 102 |
| 27 | 97,5 |
| 28 | 97,0 |
| 29 | 93,6 |
| 30 | 90,6 |
| 31 | 90,9 |
| 32 | 90,0 |
| 33 | 87,9 |
| 34 | 82,6 |
| 35 | 82,3 |
| 40 | 78,0 |
| 45 | 68,6 |
| 50 | 69,0 |

Horizontal largo

| Distancia de el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -50 | 69,9 |
| -45 | 75,5 |
| -40 | 80,4 |
| -35 | 85,5 |
| -34 | 88,9 |
| -33 | 91,6 |
| -32 | 94,2 |
| -31 | 96,0 |
| -30 | 97,8 |
| -29 | 118 |
| -28 | 104 |
| -27 | 110 |
| -26 | 113 |
| -25 | 118 |
| -24 | 122 |
| -23 | 127 |
| -22 | 129 |
| -21 | 139 |
| -20 | 146 |
| -19 | 156 |
| -18 | 166 |
| -17 | 179 |
| -16 | 194 |
| -15 | 208 |
| -14 | 221 |
| -13 | 261 |
| -12 | 283 |
| -11 | 333 |
| -10 | 421 |
| -9 | 628 |
| -8 | 1223 |
| -7 | 2234 |
| -6 | 3338 |
| -5 | 4522 |
| -4 | 5606 |
| -3 | 6699 |
| -2 | 7579 |
| -1 | 8380 |
| 0 | 8517 |

| | |
|---|---|
| 1 | 8092 |
| 2 | 7591 |
| 3 | 6668 |
| 4 | 5608 |
| 5 | 4526 |
| 6 | 3331 |
| 7 | 2232 |
| 8 | 1227 |
| 9 | 630 |
| 10 | 421 |
| 11 | 339 |
| 12 | 288 |
| 13 | 257 |
| 14 | 229 |
| 15 | 212 |
| 16 | 192 |
| 17 | 179 |
| 18 | 166 |
| 19 | 154 |
| 20 | 148 |
| 21 | 138 |
| 22 | 131 |
| 23 | 127 |
| 24 | 121 |
| 25 | 119 |
| 26 | 113 |
| 27 | 109 |
| 28 | 103 |
| 29 | 100 |
| 30 | 96,8 |
| 31 | 95,6 |
| 32 | 94,3 |
| 33 | 91,7 |
| 34 | 88,9 |
| 35 | 86,1 |
| 40 | 80,5 |
| 45 | 75,6 |
| 50 | 69,9 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

## Tabla 10

Perfil del detector GP13A/ $^{137}$Cs/889 (gamma)

Horizontal largo

| Distancia de el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -20 | 56,0 |
| -19 | 56,9 |
| -18 | 58,1 |
| -17 | 57,7 |
| -16 | 57,7 |
| -15 | 58,9 |
| -14 | 60,1 |
| -13 | 65,8 |
| -12 | 76,8 |
| -11 | 83,8 |
| -10 | 99,5 |
| -9 | 119 |
| -8 | 129 |
| -7 | 150 |
| -6 | 161 |
| -5 | 174 |
| -4 | 190 |
| -3 | 205 |
| -2 | 209 |
| -1 | 217 |
| 0 | 218 |
| 1 | 218 |
| 2 | 209 |
| 3 | 205 |
| 4 | 190 |
| 5 | 175 |
| 6 | 160 |
| 7 | 150 |
| 8 | 130 |
| 9 | 121 |
| 10 | 101 |
| 11 | 83,7 |
| 12 | 77,1 |
| 13 | 66,3 |
| 14 | 60,8 |
| 15 | 59,0 |
| 16 | 57,9 |
| 17 | 57,9 |
| 18 | 58,3 |
| 19 | 57,4 |
| 20 | 56,4 |

Horizontal largo

| Distancia de el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -25 | 56,5 |
| -24 | 57,8 |
| -23 | 57,1 |
| -22 | 57,5 |
| -21 | 57,7 |
| -20 | 58,5 |
| -19 | 59,3 |
| -18 | 60,4 |
| -17 | 63,4 |
| -16 | 62,5 |
| -15 | 63,9 |
| -14 | 64,2 |
| -13 | 68,2 |
| -12 | 70,1 |
| -11 | 70,2 |
| -10 | 72,5 |
| -9 | 76,2 |
| -8 | 92,4 |
| -7 | 108 |
| -6 | 127 |
| -5 | 149 |
| -4 | 168 |
| -3 | 187 |
| -2 | 204 |
| -1 | 212 |
| 0 | 217 |
| 1 | 212 |
| 2 | 203 |
| 3 | 188 |
| 4 | 168 |
| 5 | 150 |
| 6 | 128 |
| 7 | 109 |
| 8 | 92,4 |
| 9 | 76,4 |
| 10 | 72,2 |
| 11 | 70,4 |
| 12 | 70,3 |
| 13 | 67,9 |

| | |
|---|---|
| 14 | 64,6 |
| 15 | 64,1 |
| 16 | 62,7 |
| 17 | 63,7 |
| 18 | 60,4 |
| 19 | 59,7 |
| 20 | 58,7 |
| 21 | 59,4 |
| 22 | 56,5 |
| 23 | 57,1 |
| 24 | 57,4 |
| 25 | 55,8 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

## Tabla 11

Perfil del detector GP13A/ $^{90}$Sr/435 (beta)

Horizontal largo

| Distancia desde el origen en (cm) | [1]Valor medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -20 | 53,4 |
| -19 | 54,1 |
| -18 | 53,0 |
| -17 | 54,1 |
| -16 | 52,8 |
| -15 | 54,6 |
| -14 | 60,3 |
| -13 | 61,1 |
| -12 | 97,0 |
| -11 | 174 |
| -10 | 259 |
| -9 | 348 |
| -8 | 432 |
| -7 | 514 |
| -6 | 592 |
| -5 | 668 |
| -4 | 758 |
| -3 | 829 |
| -2 | 877 |
| -1 | 881 |
| 0 | 885 |
| 1 | 882 |
| 2 | 882 |
| 3 | 829 |
| 4 | 760 |
| 5 | 675 |
| 6 | 599 |
| 7 | 514 |
| 8 | 438 |
| 9 | 351 |
| 10 | 257 |
| 11 | 177 |
| 12 | 98,6 |
| 13 | 70,7 |
| 14 | 56,4 |
| 15 | 53,8 |
| 16 | 53,8 |
| 17 | 53,3 |
| 18 | 52,6 |
| 19 | 51,9 |
| 20 | 53,2 |

Horizontal largo

| Distancia desde el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 52,4 |
| -14 | 52,2 |
| -13 | 53,6 |
| -12 | 58,6 |
| -11 | 58,1 |
| -10 | 59,2 |
| -9 | 64,3 |
| -8 | 103 |
| -7 | 210 |
| -6 | 340 |
| -5 | 452 |
| -4 | 560 |
| -3 | 702 |
| -2 | 818 |
| -1 | 837 |
| 0 | 887 |
| 1 | 879 |
| 2 | 837 |
| 3 | 719 |
| 4 | 601 |
| 5 | 483 |
| 6 | 352 |
| 7 | 219 |
| 8 | 115 |
| 9 | 64,3 |
| 10 | 58,8 |
| 11 | 57,9 |
| 12 | 58,2 |
| 13 | 58,2 |
| 14 | 54,2 |
| 15 | 54,1 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

## Tabla 12

Perfil del detector GP13A/ $^{36}$Cl/433 (beta)

Horizontal largo

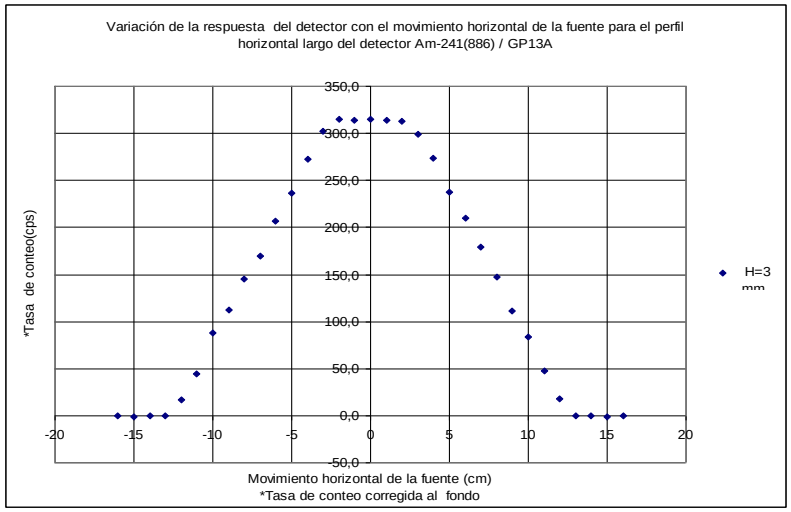
| Distancia desde el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -17 | 53,3 |
| -16 | 51,4 |
| -15 | 53,0 |
| -14 | 51,9 |
| -13 | 53,5 |
| -12 | 84,8 |
| -11 | 118 |
| -10 | 147 |
| -9 | 173 |
| -8 | 207 |
| -7 | 234 |
| -6 | 267 |
| -5 | 301 |
| -4 | 338 |
| -3 | 357 |
| -2 | 375 |
| -1 | 376 |
| 0 | 376 |
| 1 | 375 |
| 2 | 376 |
| 3 | 353 |
| 4 | 341 |
| 5 | 296 |
| 6 | 258 |
| 7 | 227 |
| 8 | 201 |
| 9 | 167 |
| 10 | 127 |
| 11 | 98,1 |
| 12 | 65,6 |
| 13 | 52,0 |
| 14 | 52,3 |
| 15 | 51,9 |
| 16 | 52,2 |
| 17 | 52,5 |

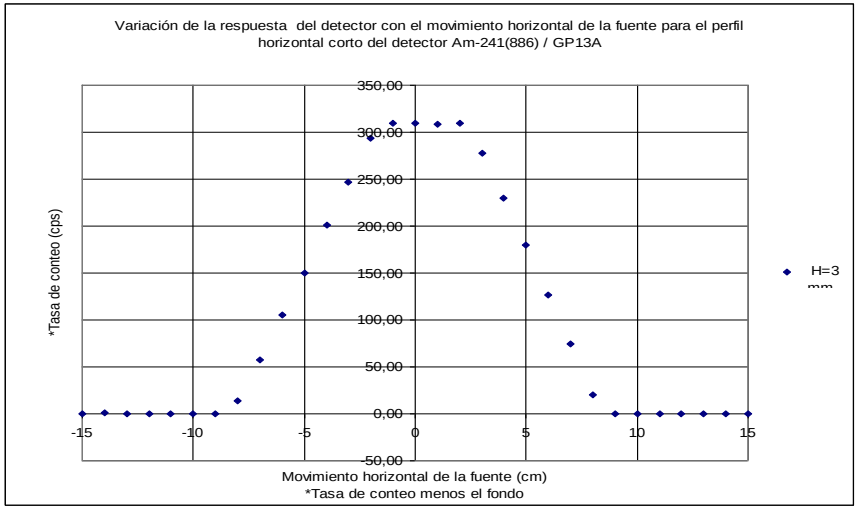
Horizontal largo

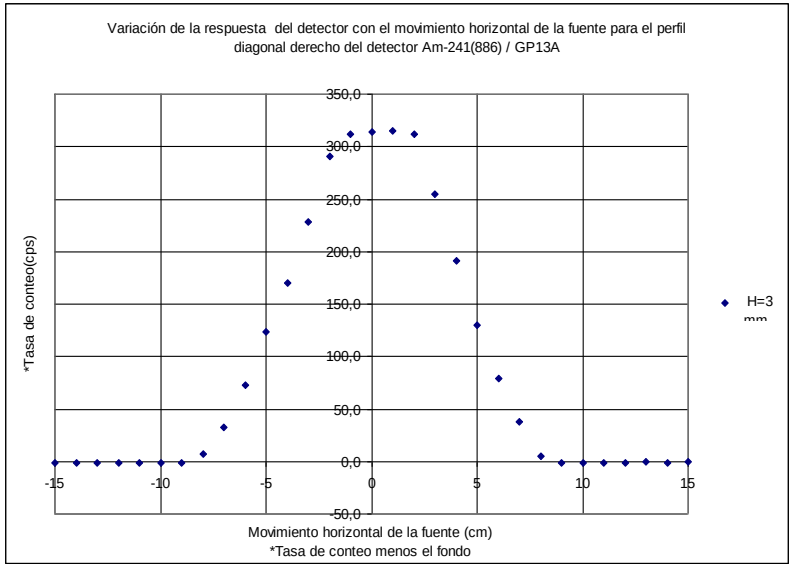
| Distancia desde el origen en (cm) | [1]Valor Medio ($^{-1}$s) |
|---|---|
| -15 | 53,7 |
| -14 | 55,7 |
| -13 | 53,9 |
| -12 | 52,9 |
| -11 | 55,1 |
| -10 | 55,2 |
| -9 | 54,1 |
| -8 | 64,4 |
| -7 | 116 |
| -6 | 168 |
| -5 | 209 |
| -4 | 267 |
| -3 | 309 |
| -2 | 359 |
| -1 | 373 |
| 0 | 377 |
| 1 | 371 |
| 2 | 361 |
| 3 | 307 |
| 4 | 259 |
| 5 | 212 |
| 6 | 166 |
| 7 | 113 |
| 8 | 71,1 |
| 9 | 53,6 |
| 10 | 55,1 |
| 11 | 54,1 |
| 12 | 55,1 |
| 13 | 54,0 |
| 14 | 55,3 |
| 15 | 54,0 |

[1]El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

FIGURA 5


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Am-241(886) / GP13A
*Tasa de conteo(cps)
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo corregida al fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Am-241(886) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
350,00
300,00
250,00
200,00
150,00
100,00
50,00
0,00
-50,00
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector Am-241(886) / GP13A
*Tasa de conteo(cps)
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

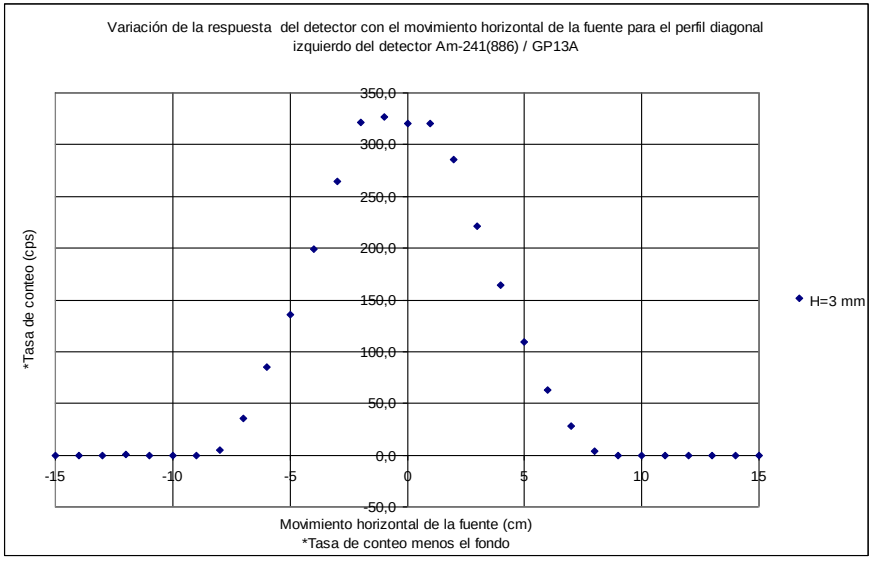
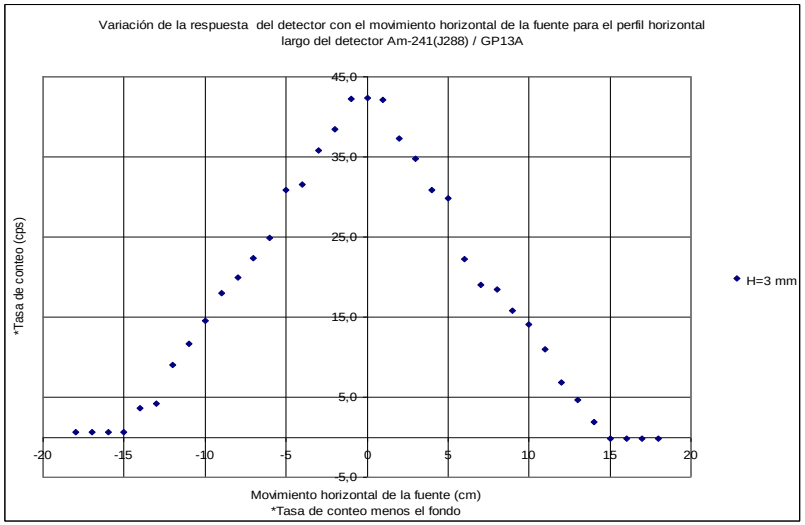
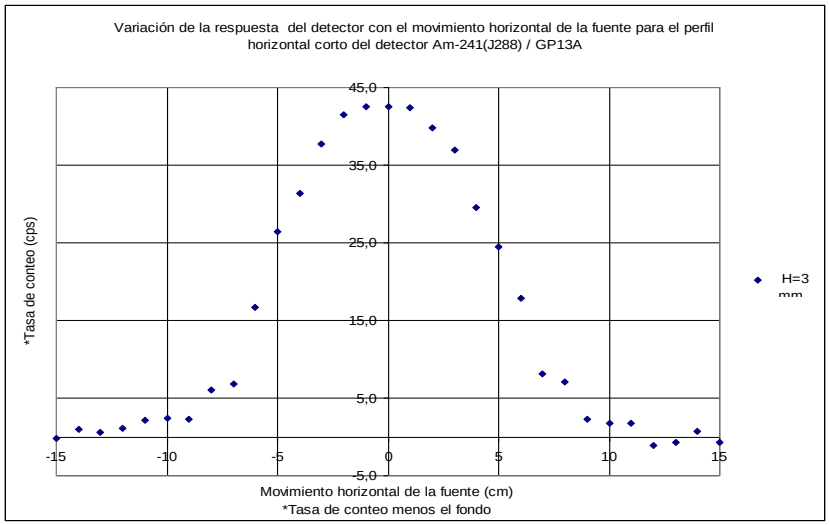
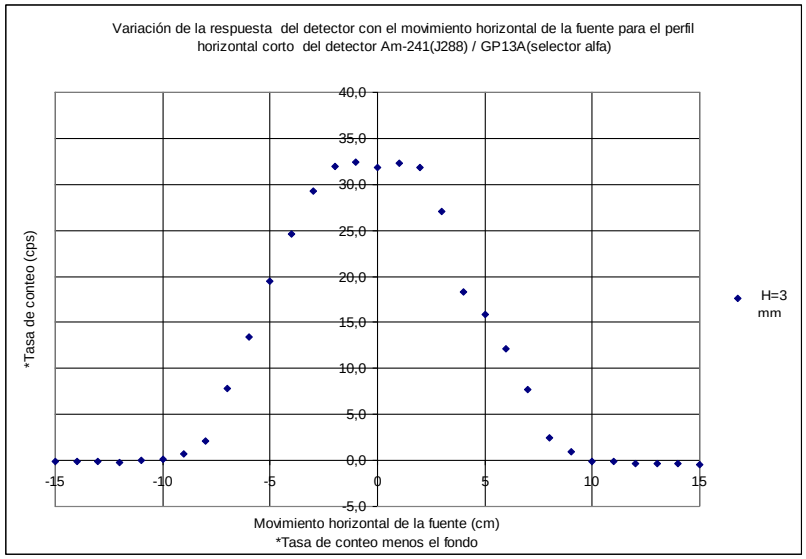

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector Am-241(886) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 6


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Am-241(J288) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
45,0
35,0
25,0
15,0
5,0
-5,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Am-241(J288) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
45,0
35,0
25,0
15,0
5,0
-5,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Am-241(J288) / GP13A(selector alfa)
*Tasa de conteo (cps)
40,0
35,0
30,0
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
-5,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

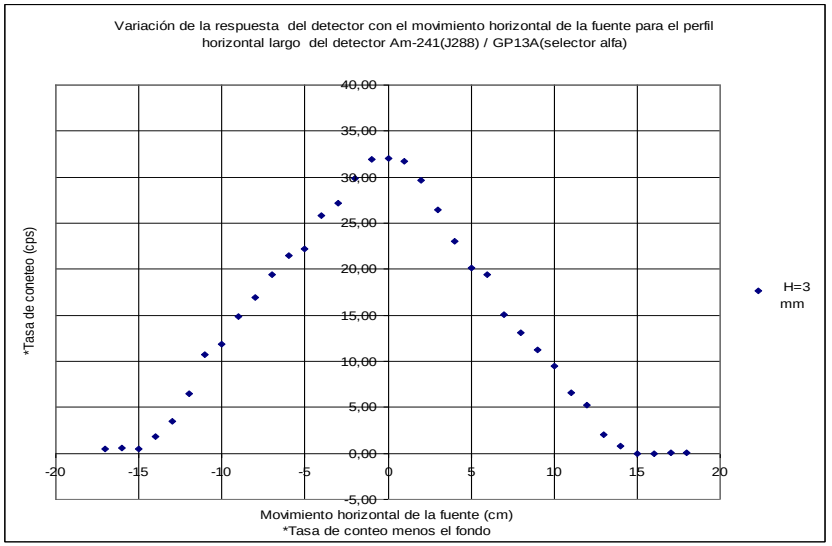
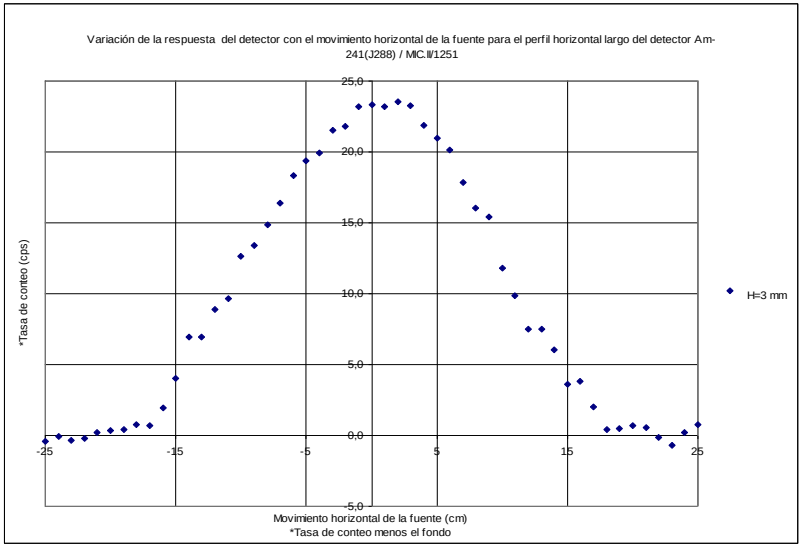
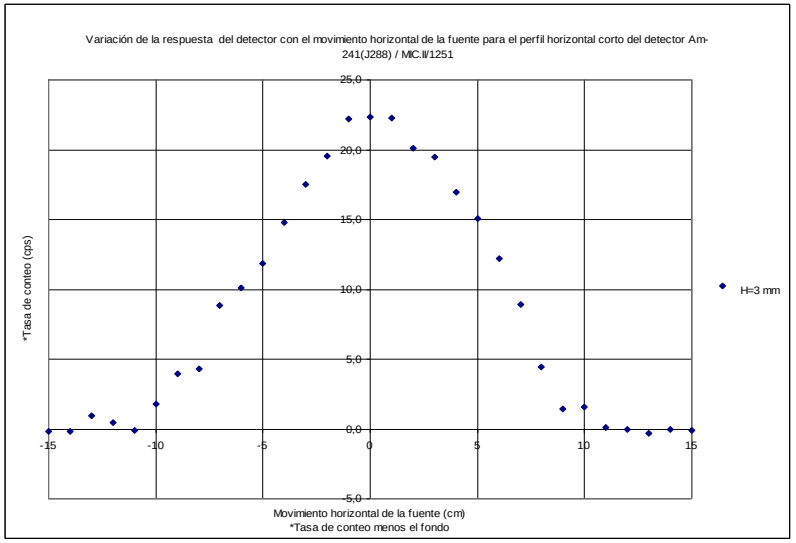
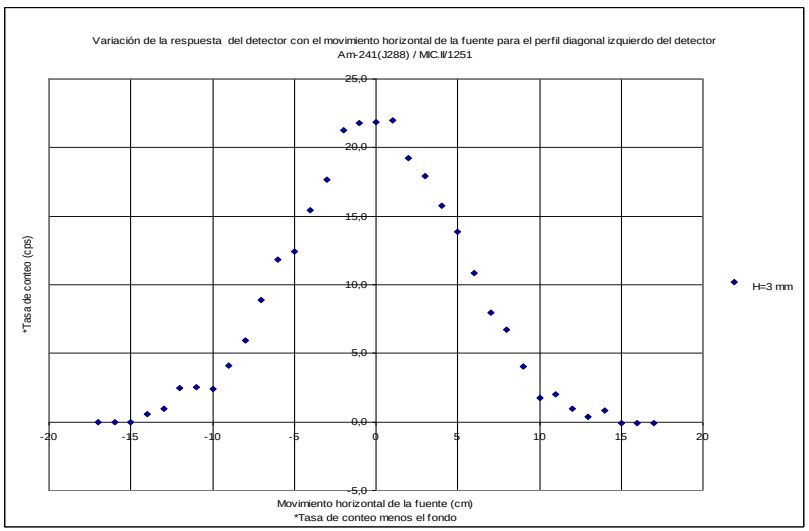

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Am-241(J288) / GP13A(selector alfa)
*Tasa de coneteo (cps)
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
-5,00
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 7


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Am-241(J288) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
-5,0
-25
-15
-5
5
15
25
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Am-241(J288) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
-5,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector
Am-241(J288) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
-5,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

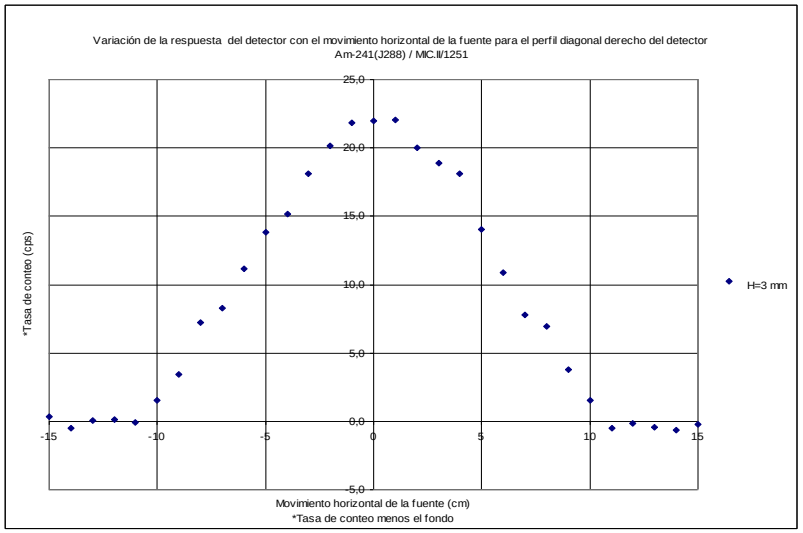
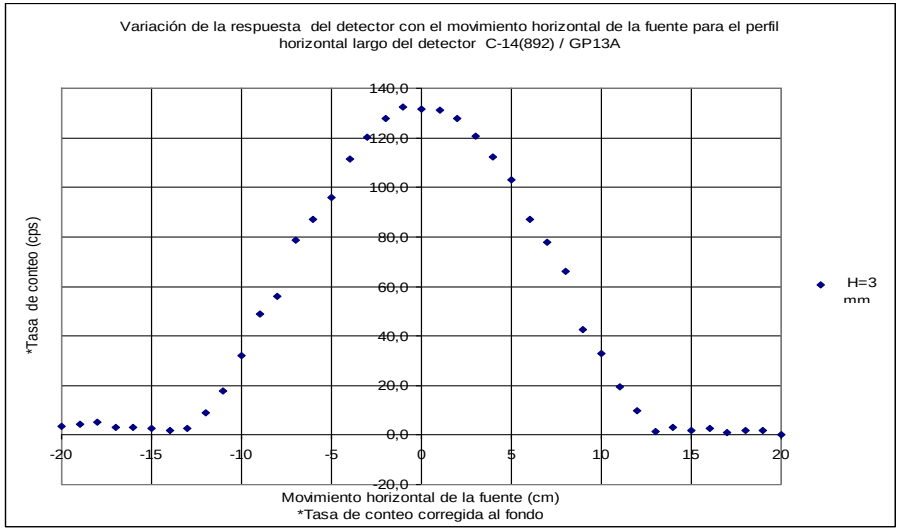
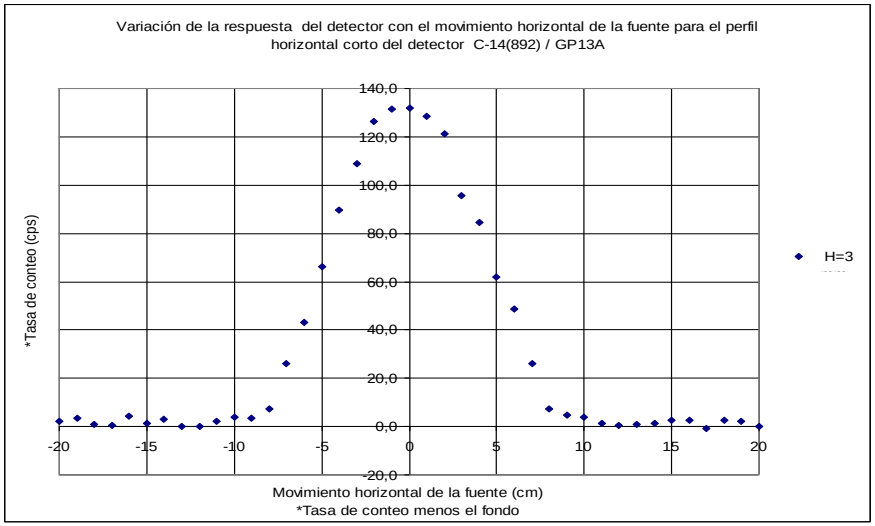
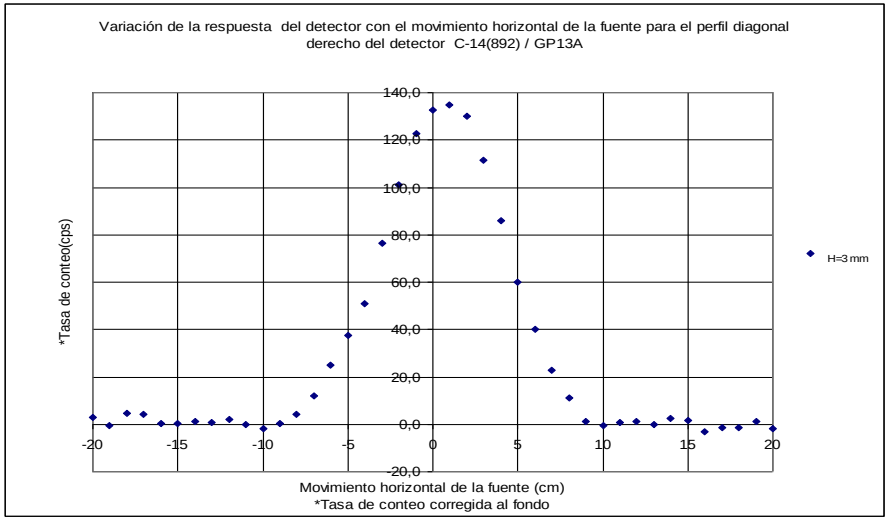

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector
Am-241(J288) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
-5,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 8


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector C-14(892) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo corregida al fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector C-14(892) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector C-14(892) / GP13A
*Tasa de conteo(cps)
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo corregida al fondo

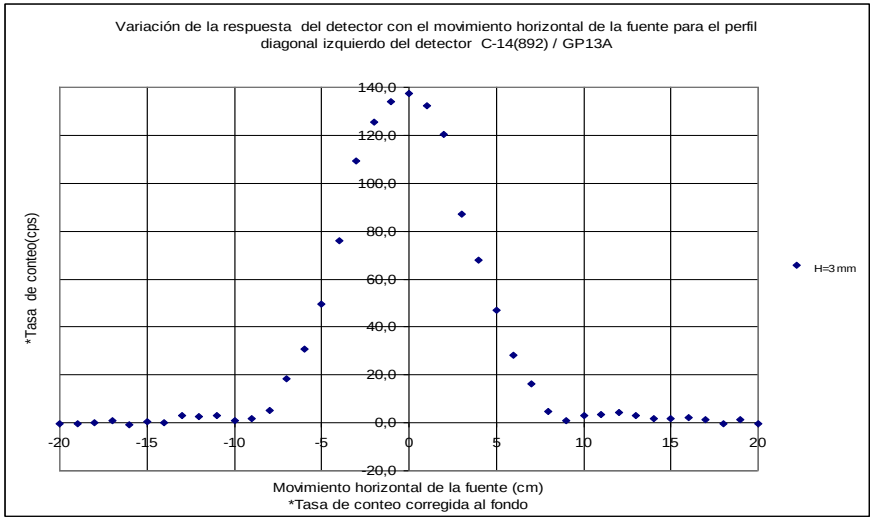
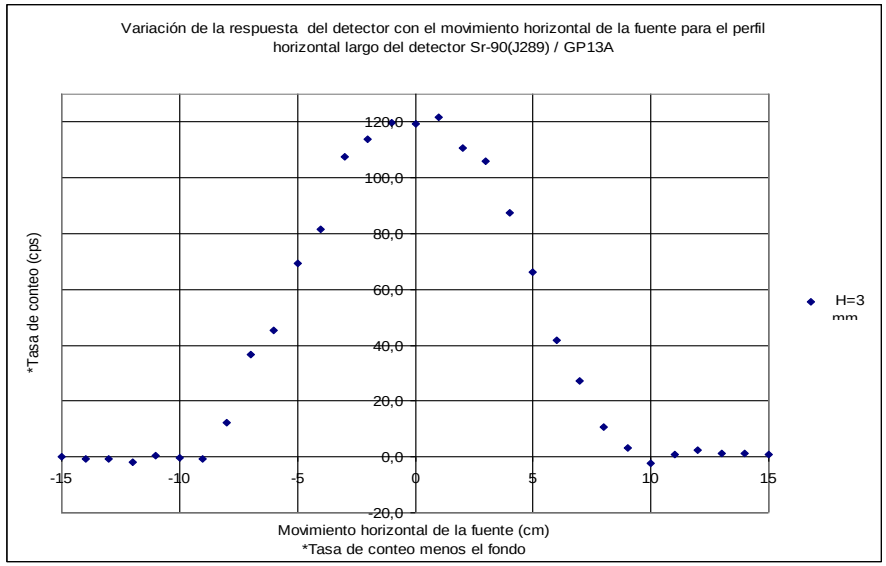
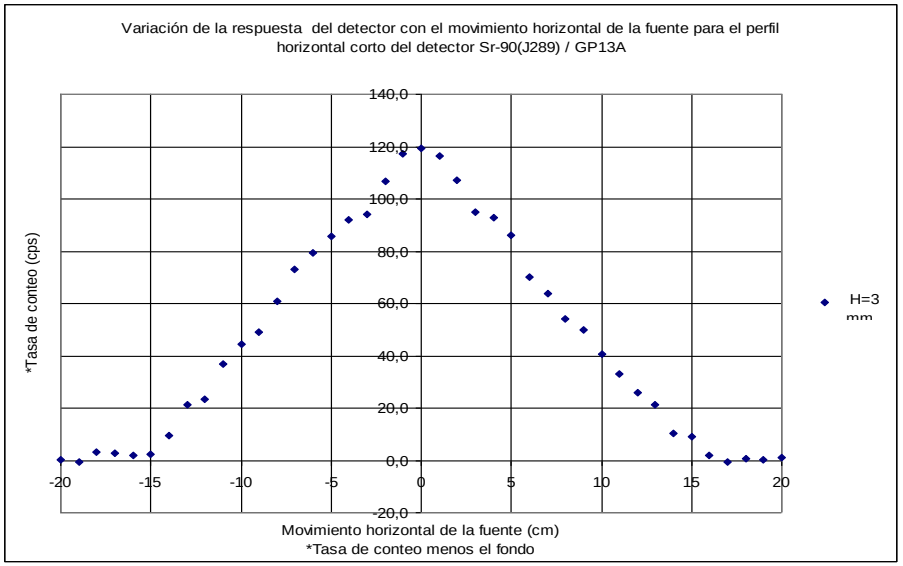
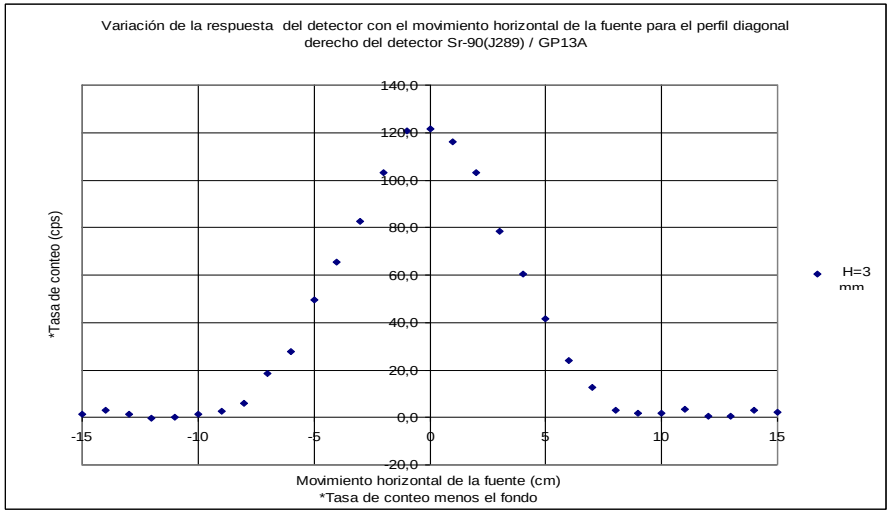

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector C-14(892) / GP13A
*Tasa de conteo(cps)
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo corregida al fondo

FIGURA 9


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Sr-90(J289) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Sr-90(J289) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector Sr-90(J289) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm

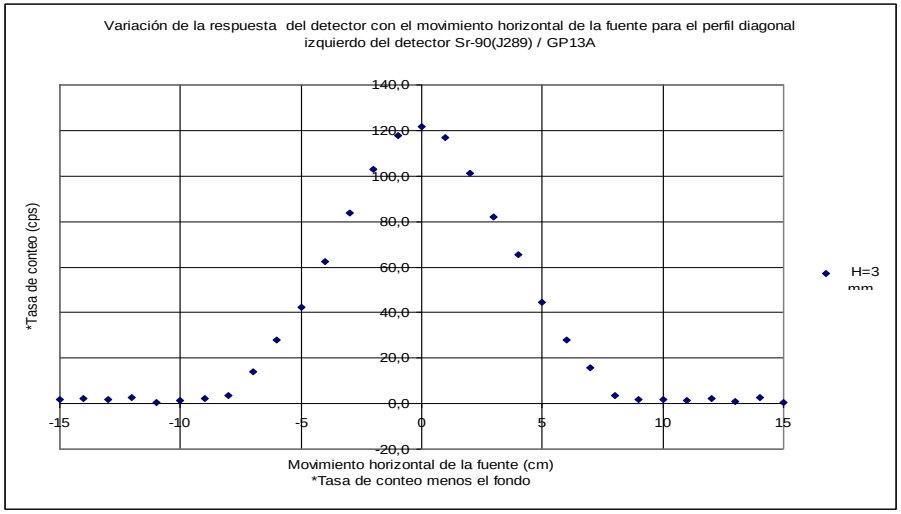
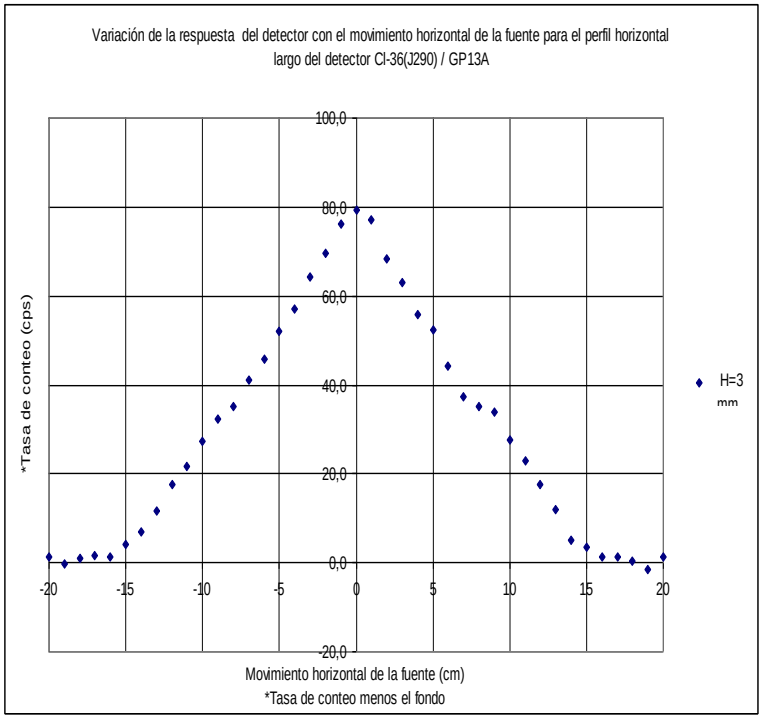

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector Sr-90(J289) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm

FIGURA 10


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Cl-36(J290) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

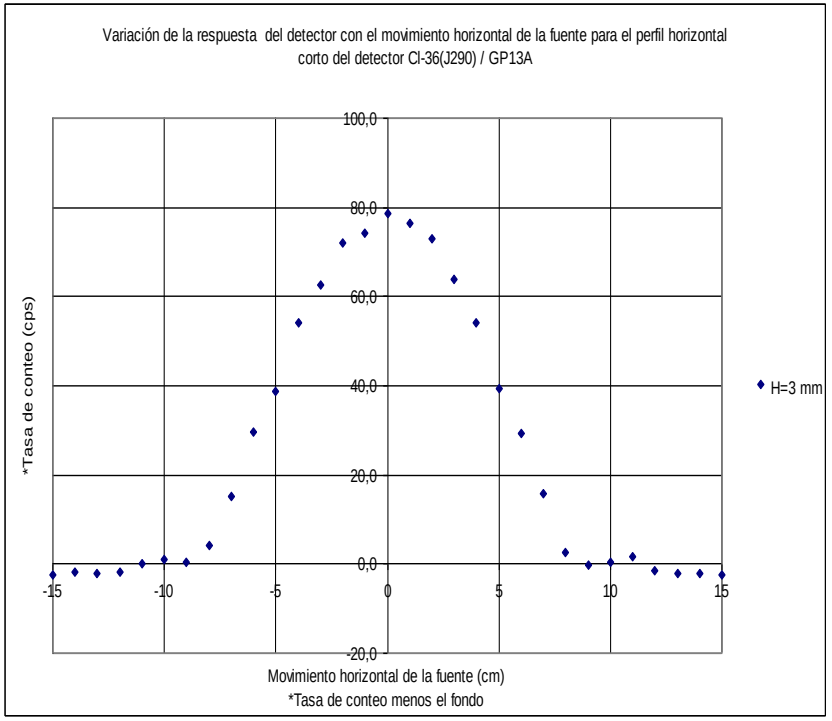
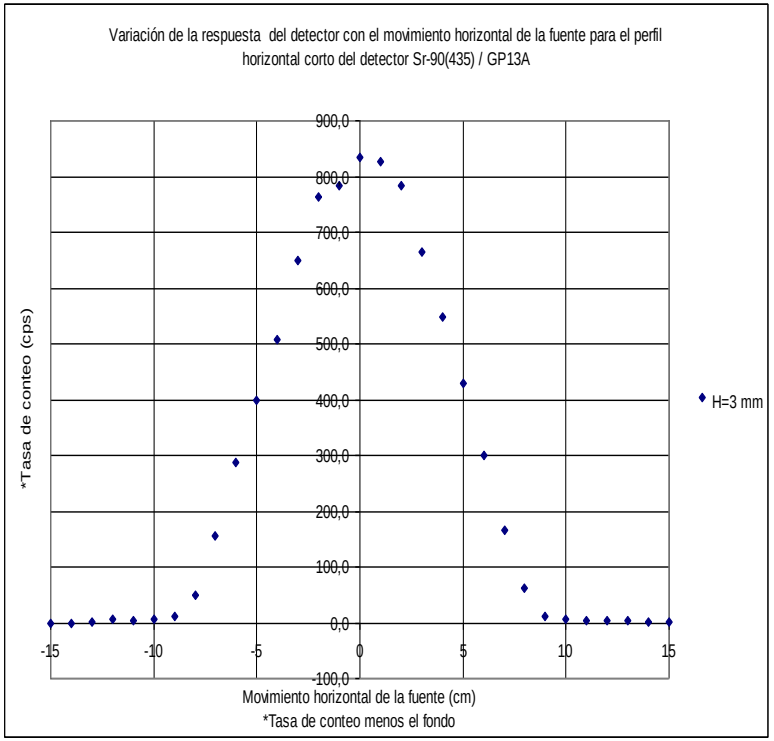

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Cl-36(J290) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 11


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Sr-90(435) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
900,0
800,0
700,0
600,0
500,0
400,0
300,0
200,0
100,0
0,0
-100,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

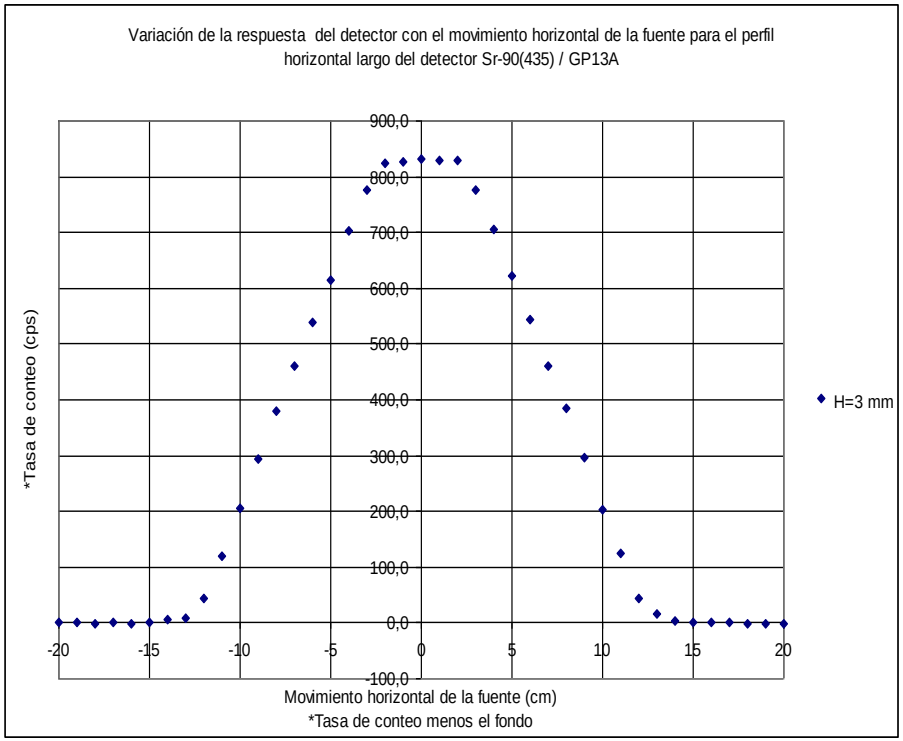
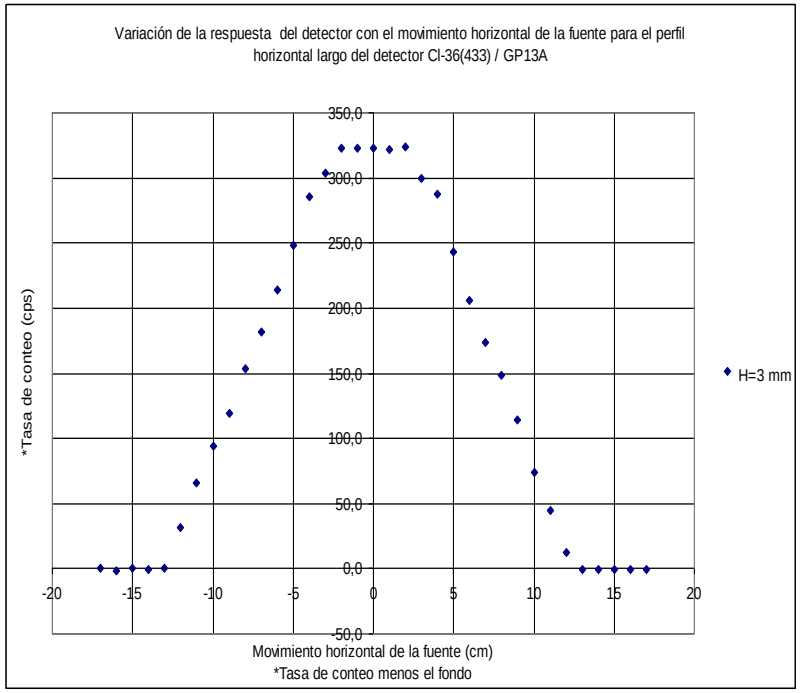

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Sr-90(435) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
900,0
800,0
700,0
600,0
500,0
400,0
300,0
200,0
100,0
0,0
-100,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 12


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Cl-36(433) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

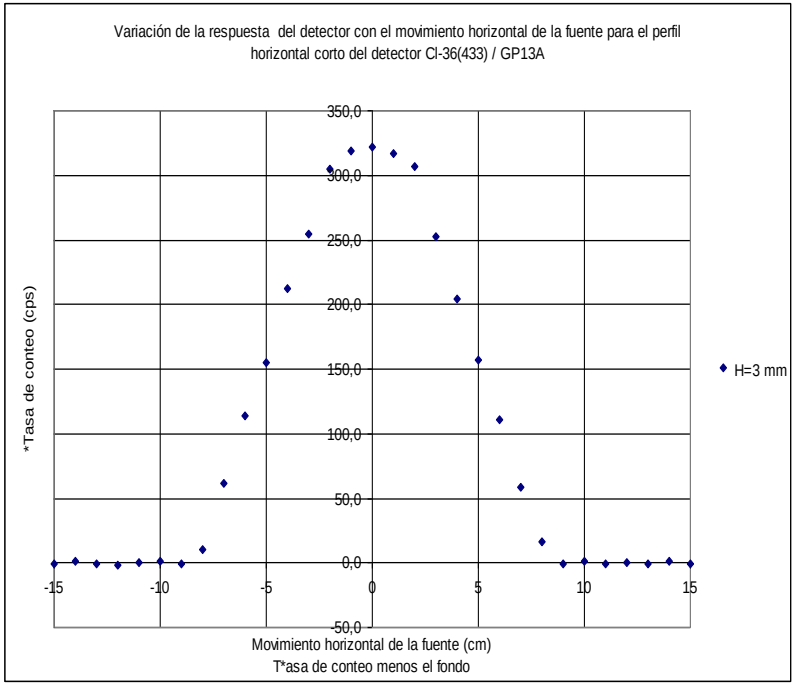

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Cl-36(433) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
T*asa de conteo menos el fondo

FIGURA 13

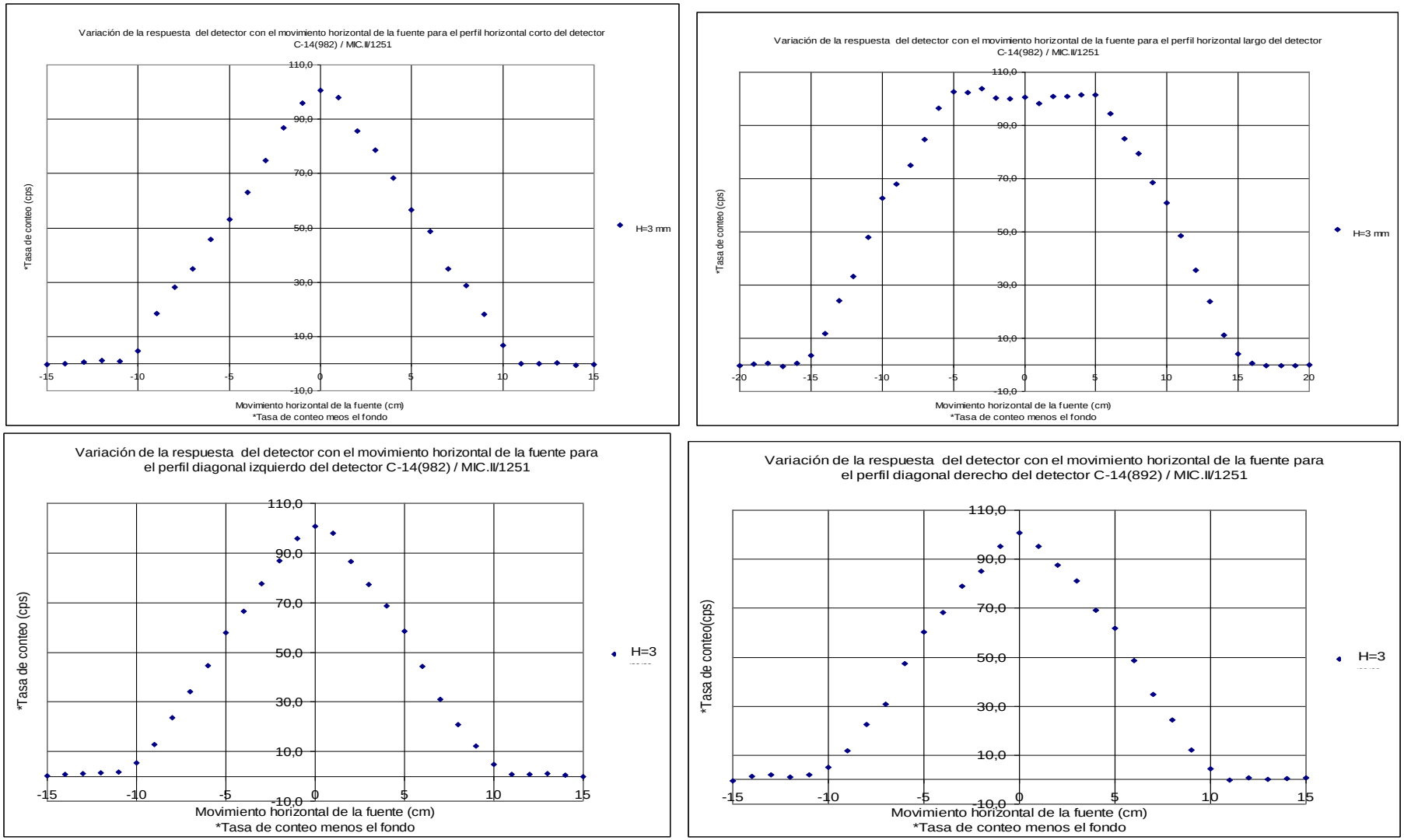
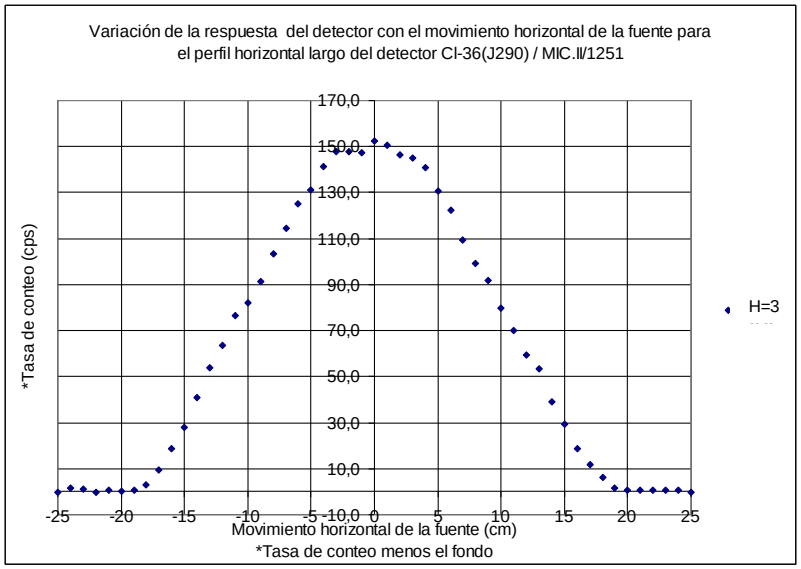
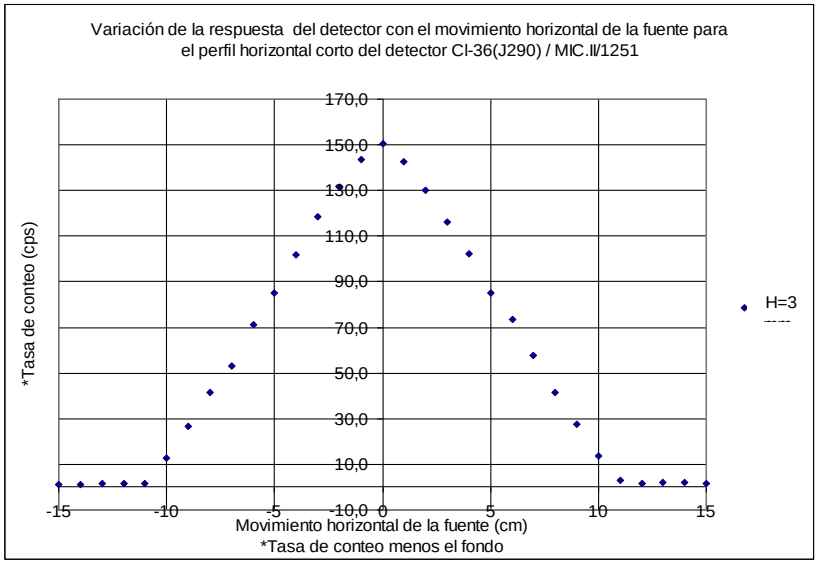
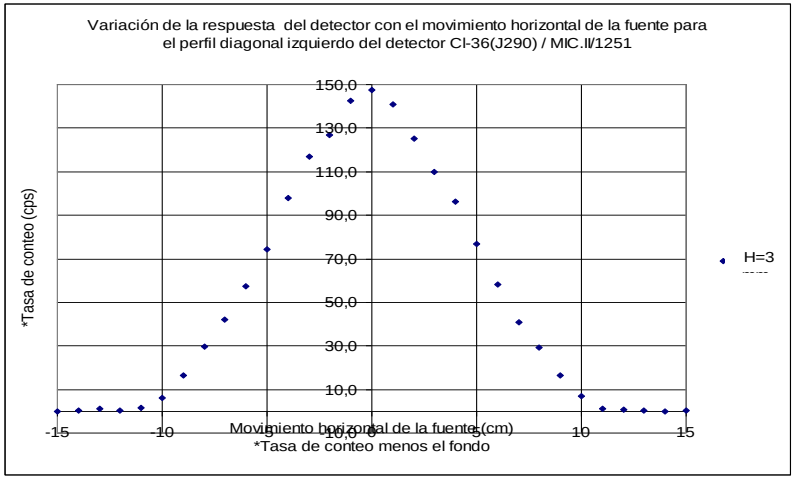

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector C-14(982) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo meos el fondo
H=3 mm
Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector C-14(982) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm
Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector C-14(982) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3
Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector C-14(892) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo(cps)
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3

FIGURA 14


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Cl-36(J290) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
170,0
150,0
130,0
110,0
90,0
70,0
50,0
30,0
10,0
-10,0
-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Cl-36(J290) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
170,0
150,0
130,0
110,0
90,0
70,0
50,0
30,0
10,0
-10,0
-15 -10 -5 0 5 10 15
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector Cl-36(J290) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
150,0
130,0
110,0
90,0
70,0
50,0
30,0
10,0
-10,0
-15 -10 -5 0 5 10 15
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3

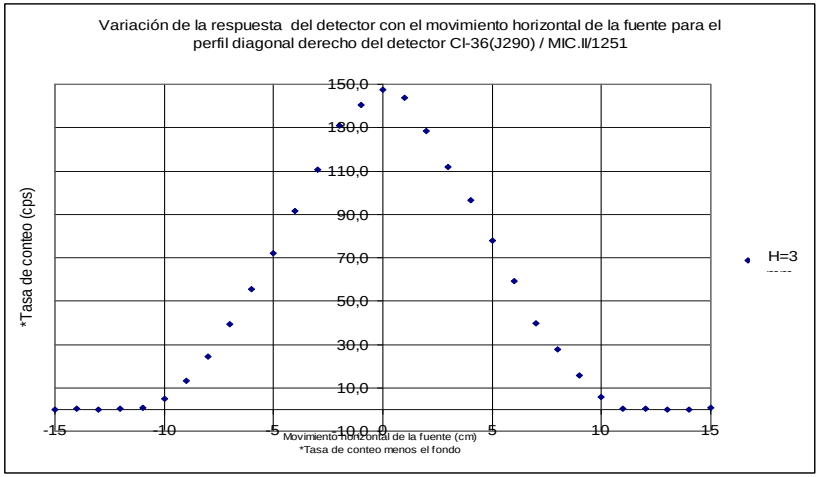
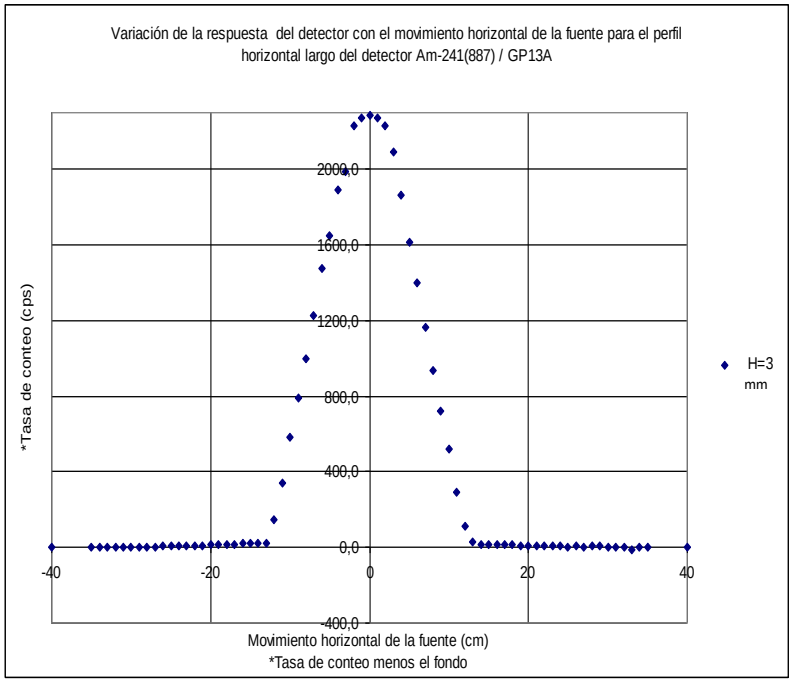

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector Cl-36(J290) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
150,0
130,0
110,0
90,0
70,0
50,0
30,0
10,0
-10,0
-15 -10 -5 0 5 10 15
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3

FIGURA 15


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Am-241(887) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
2000,0
1600,0
1200,0
800,0
400,0
0,0
-400,0
-40
-20
0
20
40
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

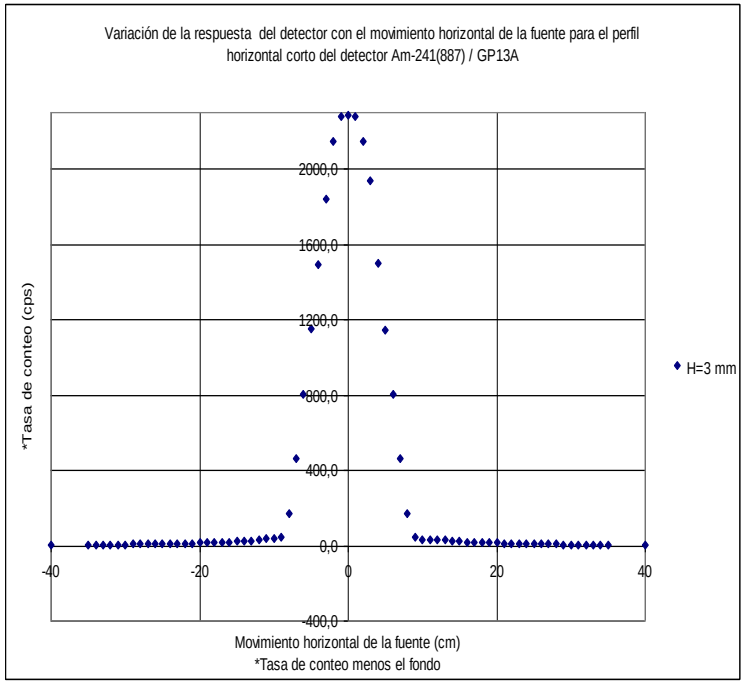
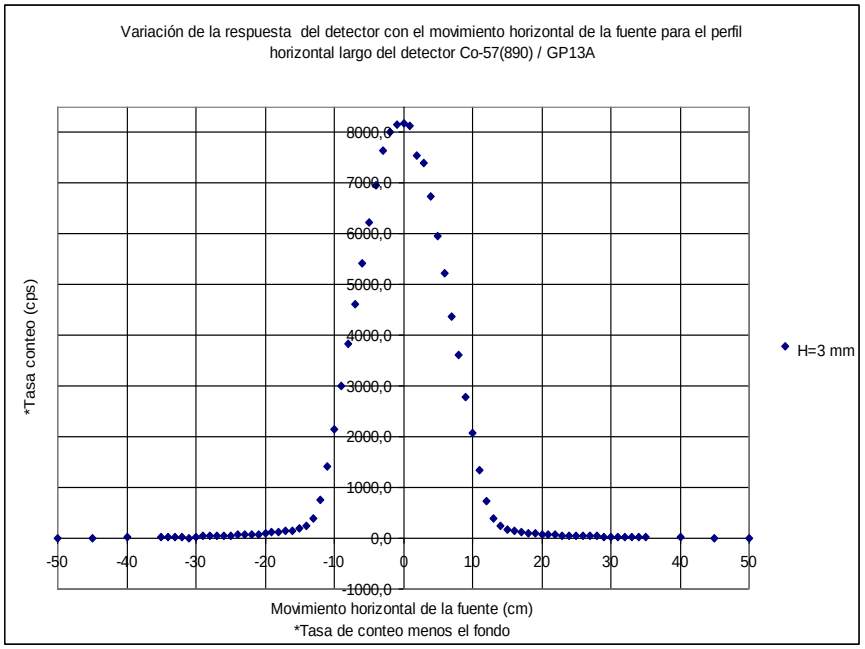

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Am-241(887) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
2000,0
1600,0
1200,0
800,0
400,0
0,0
-400,0
-40
-20
0
20
40
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 16


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Co-57(890) / GP13A
*Tasa conteo (cps)
8000,0
7000,0
6000,0
5000,0
4000,0
3000,0
2000,0
1000,0
0,0
-1000,0
-50
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

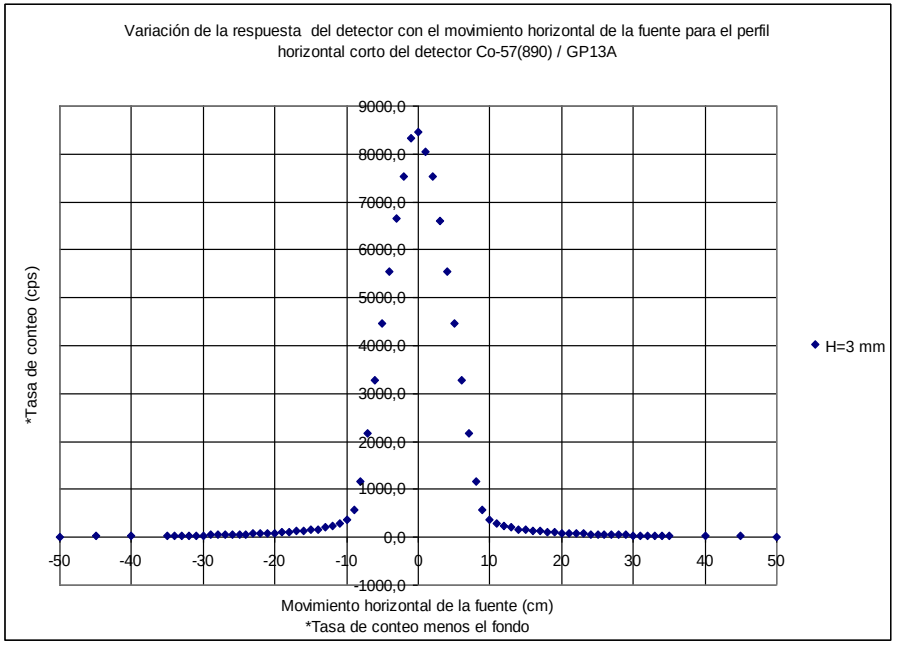
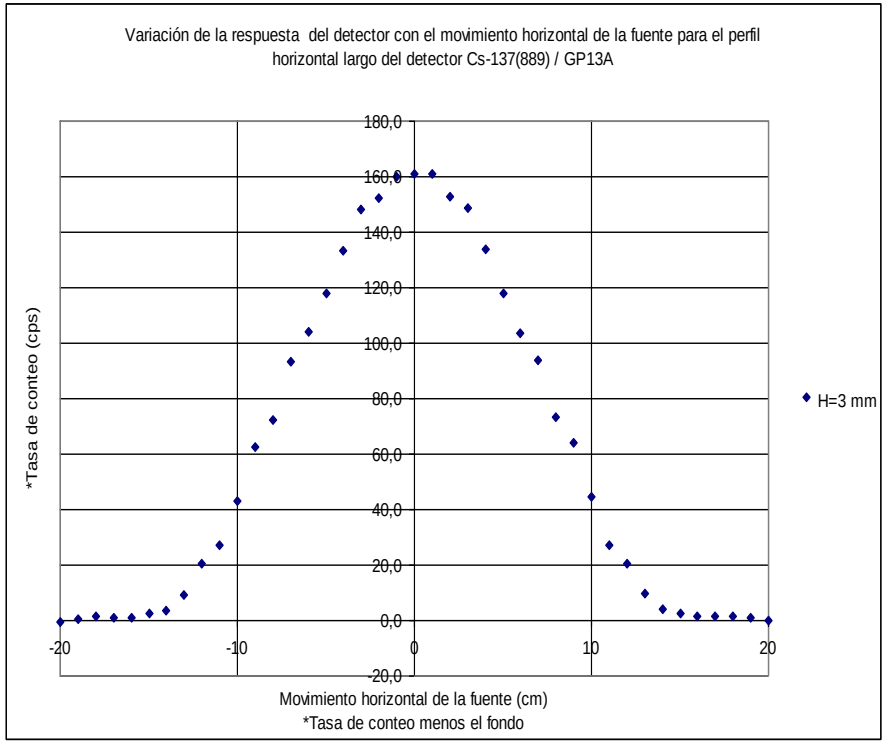

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Co-57(890) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
9000,0
8000,0
7000,0
6000,0
5000,0
4000,0
3000,0
2000,0
1000,0
0,0
-1000,0
-50
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 17


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Cs-137(889) / GP13A
*Tasa de conteo (cps)
180,0
160,0
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-20
-10
0
10
20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

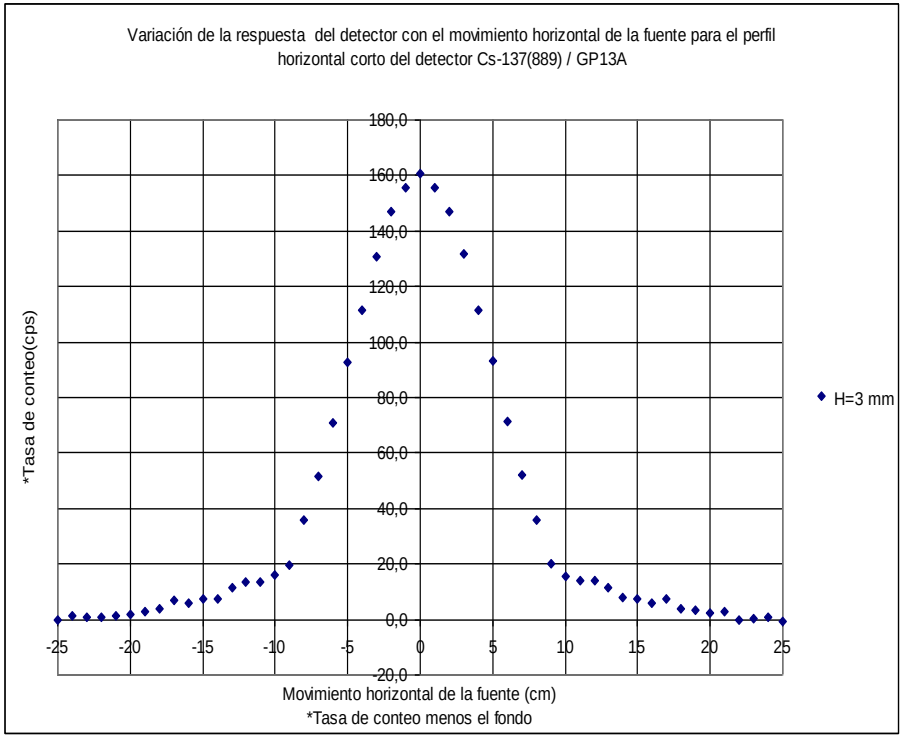
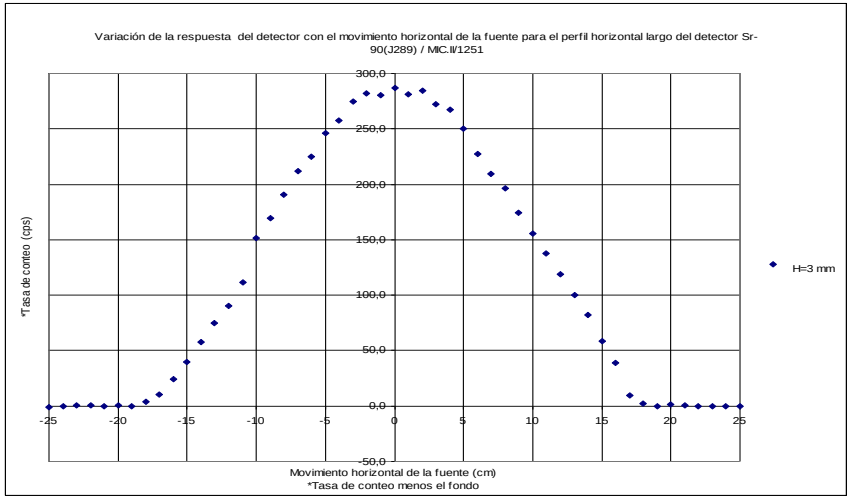
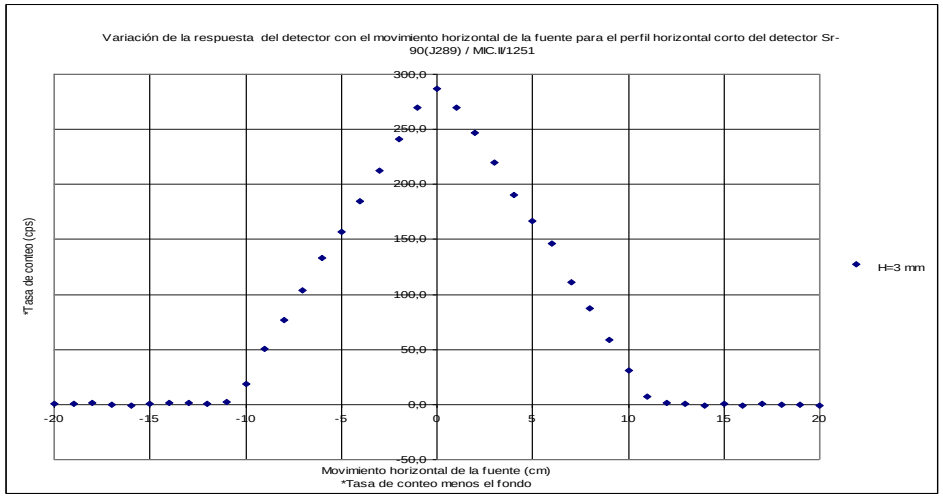
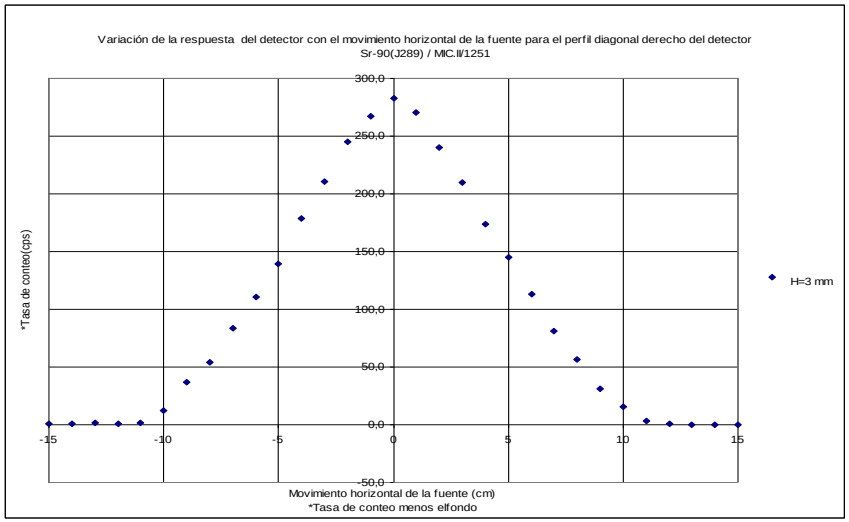

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Cs-137(889) / GP13A
*Tasa de conteo(cps)
180,0
160,0
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
-20,0
-25
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
25
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 18


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Sr-90(J289) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-25
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
25
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Sr-90(J289) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector Sr-90(J289) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo(cps)
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos elfondo

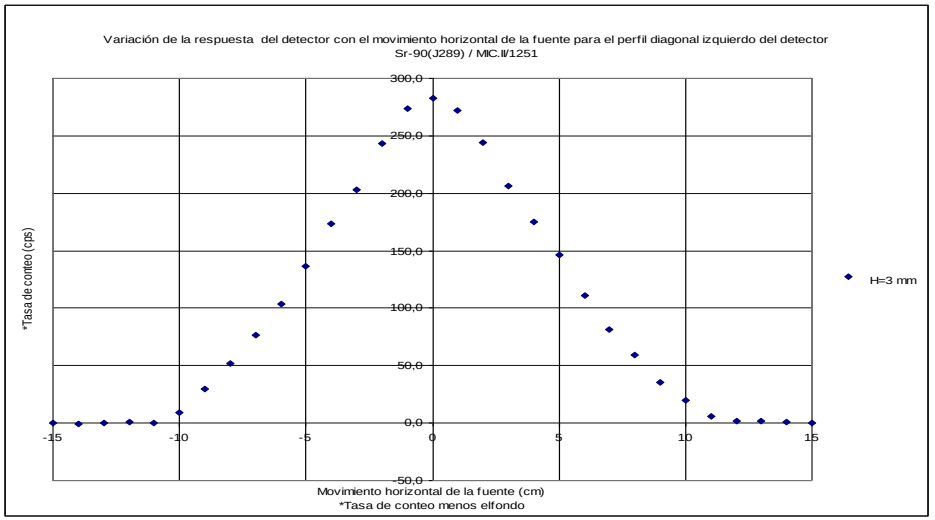
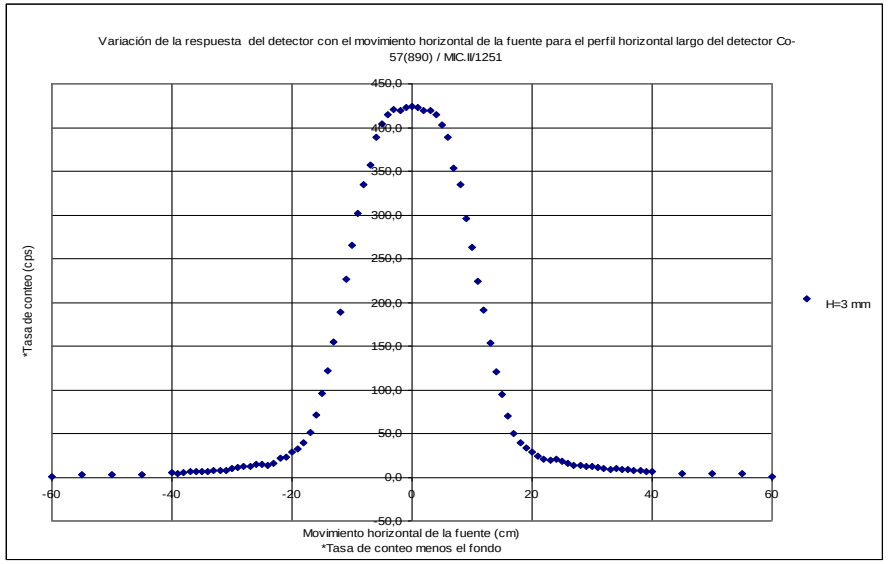

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector Sr-90(J289) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-15
-10
-5
0
5
10
15
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos elfondo

FIGURA 19


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Co-57(890) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
450,0
400,0
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-60
-40
-20
0
20
40
60
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

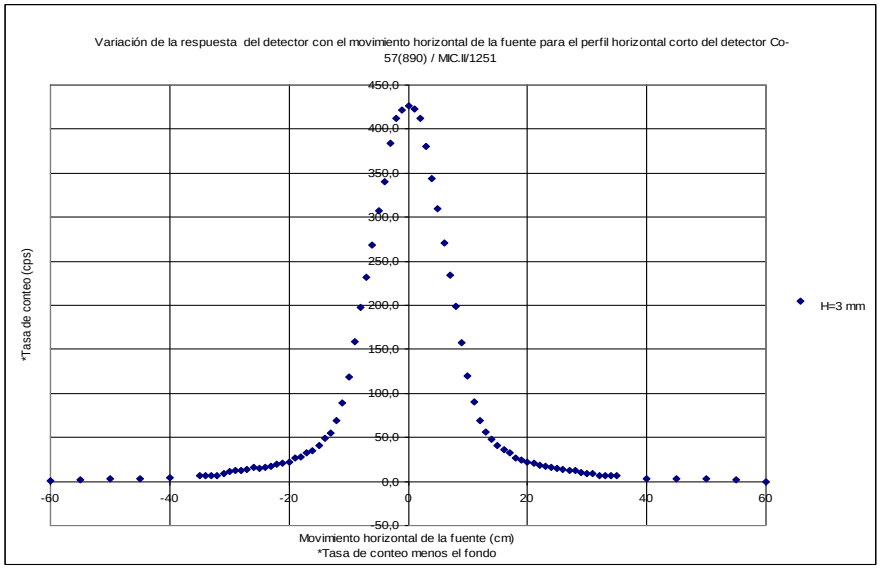
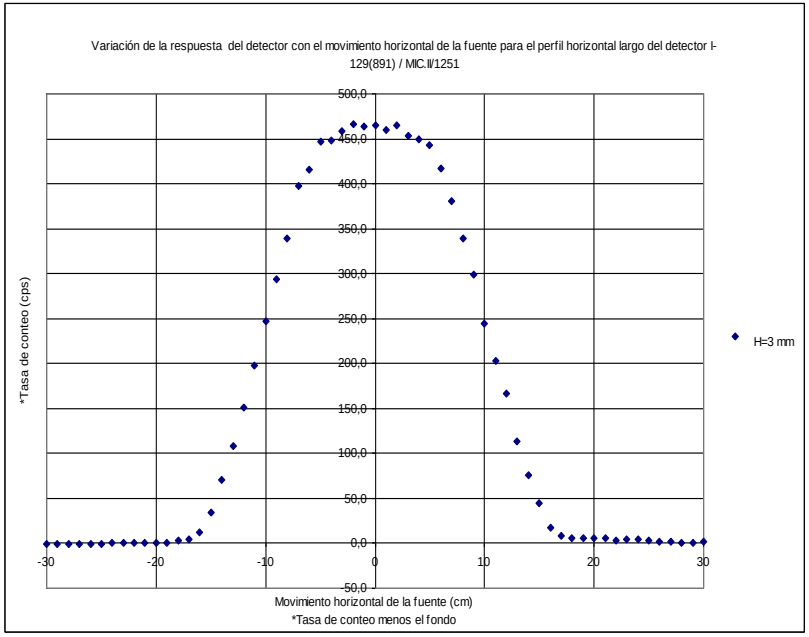

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Co-57(890) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
450,0
400,0
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-60
-40
-20
0
20
40
60
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

FIGURA 20


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector I-129(891) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
500,0
450,0
400,0
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-30
-20
-10
0
10
20
30
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

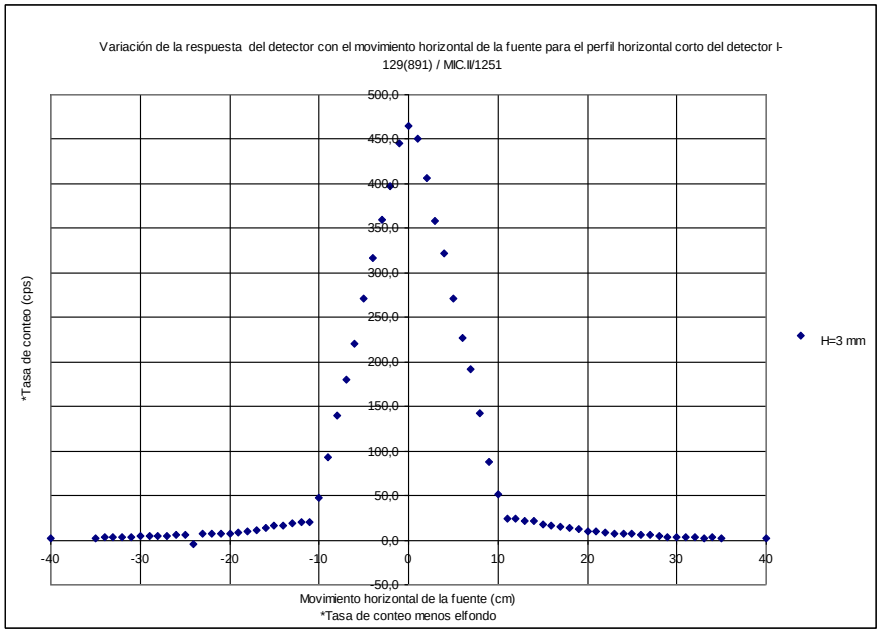
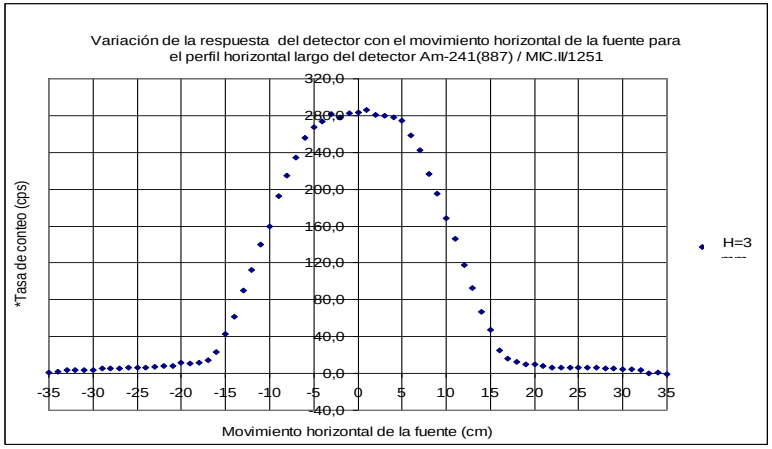
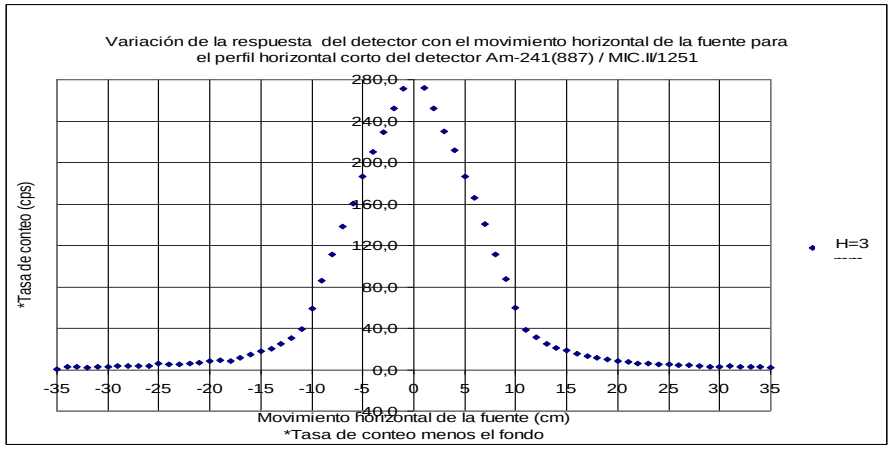
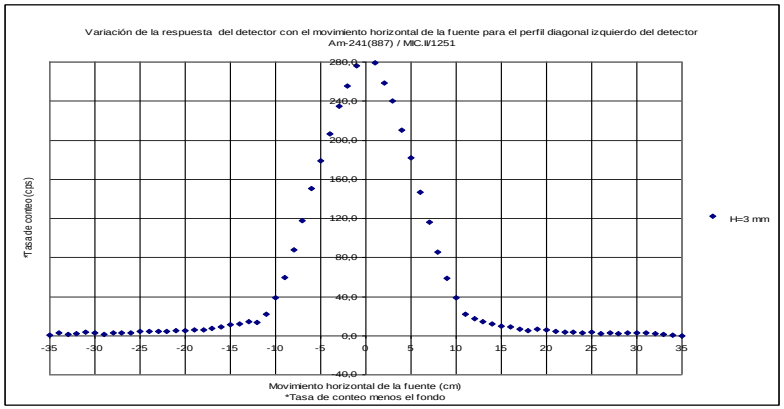

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector I-129(891) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
500,0
450,0
400,0
350,0
300,0
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
-50,0
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos elfondo

FIGURA 21


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector Am-241(887) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
320,0
280,0
240,0
200,0
160,0
120,0
80,0
40,0
0,0
-40,0
-35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
H=3


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector Am-241(887) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
280,0
240,0
200,0
160,0
120,0
80,0
40,0
0,0
-40,0
-35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector
Am-241(887) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
280,0
240,0
200,0
160,0
120,0
80,0
40,0
0,0
-40,0
-35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm

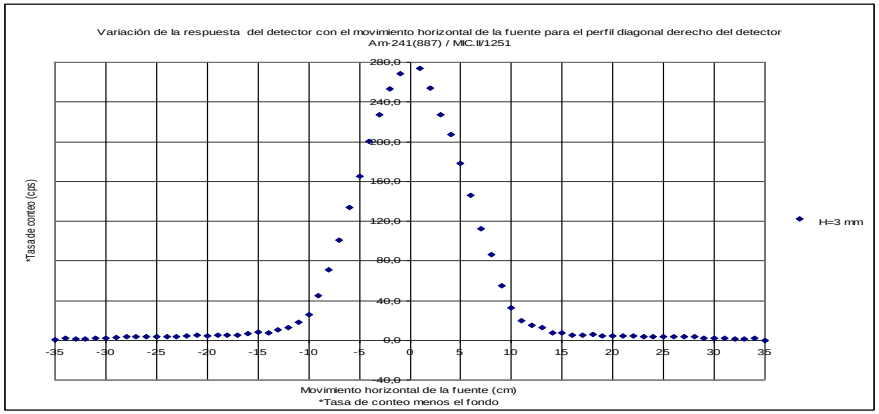
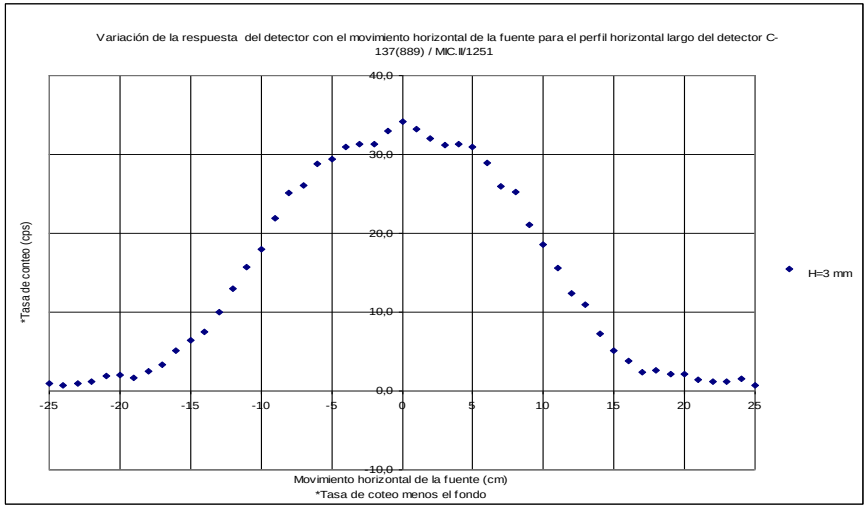
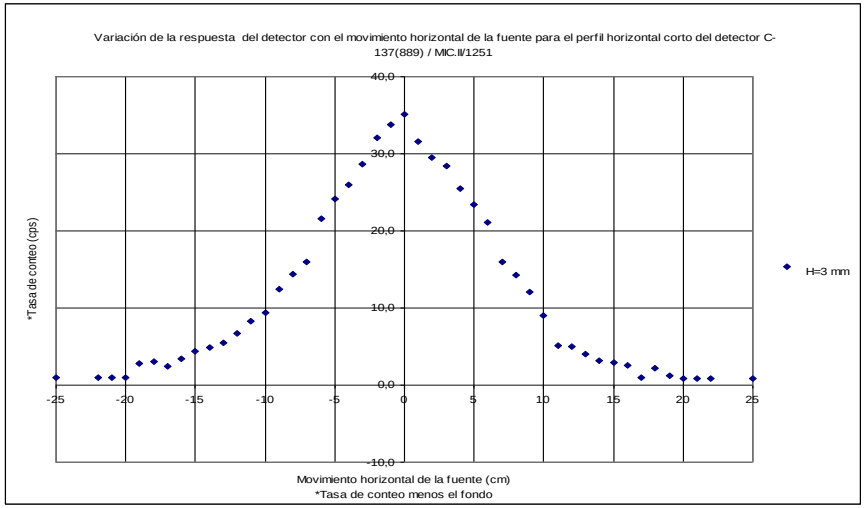
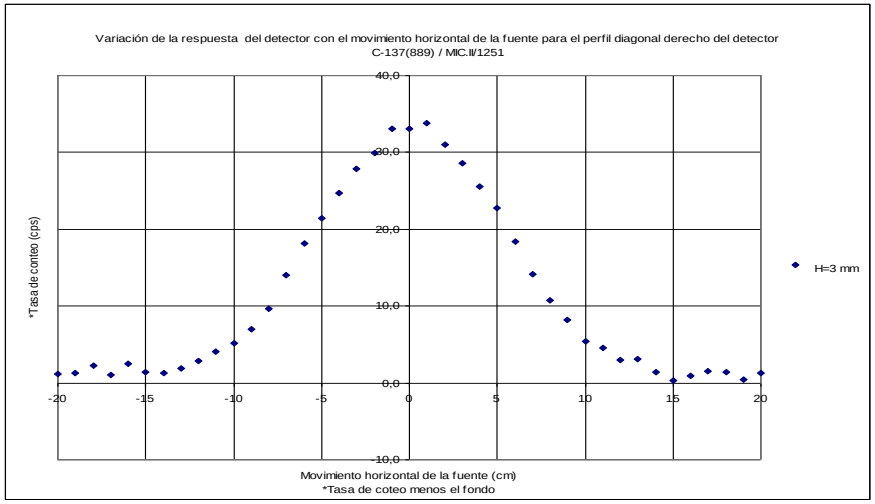
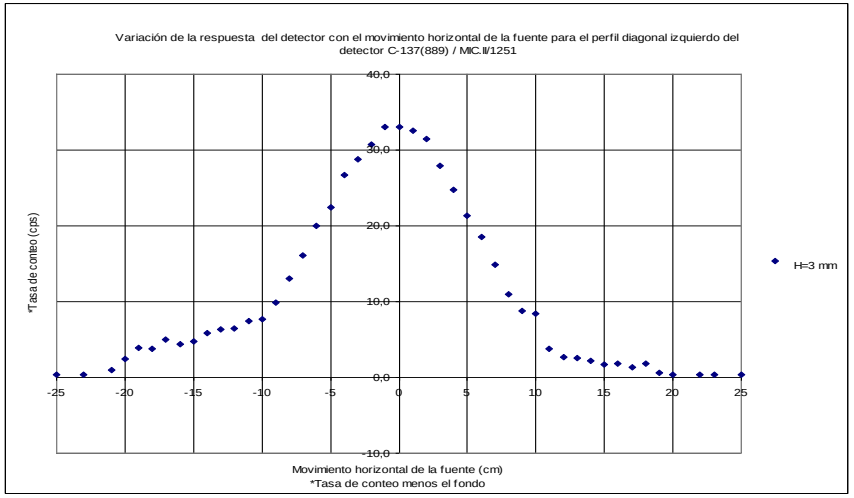

Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector
Am-241(887) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
280,0
240,0
200,0
160,0
120,0
80,0
40,0
0,0
-40,0
-35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo
H=3 mm

FIGURA 22


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal largo del detector C-137(889) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
-10,0
-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de coteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil horizontal corto del detector C-137(889) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
-10,0
-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal derecho del detector C-137(889) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
-10,0
-20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de coteo menos el fondo


Variación de la respuesta del detector con el movimiento horizontal de la fuente para el perfil diagonal izquierdo del detector C-137(889) / MIC.II/1251
*Tasa de conteo (cps)
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
-10,0
-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25
H=3 mm
Movimiento horizontal de la fuente (cm)
*Tasa de conteo menos el fondo

.

### 3.3 Resultado del estudio de uniformidad de las fuentes

La uniformidad de las fuentes de referencias se determinó según ISO 8769-1[33]. y 8769-2[34] "la desviación estándar de las mediciones calculada de la porción individual sobre el valor medio por la superficie total expresada como un porciento del valor medio" donde la porción de la fuente medida es igual a un área no mayor de 10 $cm^2$. Se requiere que la uniformidad de dicha fuente en términos de tasa de emisión superficial no sea superior al ± 10%.

Para el estudio de la uniformidad de las fuentes se usaron los detectores GP13A, RXE-260 Xenón y el Saphymo Centellante. Las fuentes alfa y beta fueron blindadas con una lámina de acero de iguales dimensiones que la fuente y 3 mm de espesor, suficiente para atenuar la emisión de la fuente y en estas condiciones lograr que la detección esté en el orden del fondo.

Los resultados del estudio de uniformidad de la fuente $^{241}$Am/886 medida con tres detectores distintos (Tabla11 - 13) y los resultados obtenidos cumplen con los requisitos de la ISO 8769.

Para la fuentes beta: $^{90}$Sr /435, $^{14}$C /892 y $^{36}$Cl /433 se usaron los mismos detectores que para las alfas y los resultados se muestran en las tablas de la (14 - 22). Todas cumplen con los requisitos de la ISO 8769.

El análisis de varianza es un criterio aceptado para demostrar que no hay diferencias significativas entre las comparadas ISO/REMCO TG 5, [27]. Esta prueba consiste en la aplicación de un Fisher para comparar el factor experimental obtenido con el factor tabulado teórico. Si el factor experimental, es menor que el factor tabulado, significa que no hay diferencias significativas entre las muestras para un nivel de confianza del 95 %.

Los resultados del experimento realizado aparecen en los anexos (13 - 24), se corroboró que entre las muestras comparadas, no hay diferencias significativas. Para todas las fuentes analizadas siempre el factor experimental es menor que el teórico. La fuente que tiene menor probabilidad de homogeneidad es la $^{36}$Cl medida con el detector GP13A, cuya diferencia entre el factor experimental y el crítico de Fisher es pequeña, pero sigue cumpliendo con el criterio de aceptación.

La homogeneidad de las fuentes gamma no fue determinada, debido a que el espesor del blindaje para atenuar la radiación hasta el orden del fondo radiactivo, superaba varias

veces la distancia (fuente - detector) de interés para la calibración; por lo que se decidió no incluirlo dentro de esta investigación.

TABLA 11

Uniformidad de la fuente Am-241(886EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>1,4% | 2<br>6,2% | 3<br>1,7% | 4<br>2,3% | 5<br>0,7% |
| 6<br>4,8% | 7<br>3,4% | 8<br>1,3% | 9<br>5,0% | 10<br>1,3% |
| 11<br>2,4% | 12<br>1,1% | 13<br>2,5% | 14<br>1,0% | 15<br>3,8% |
| 16<br>3,0% | 17<br>1,8% | 18<br>3,0% | 19<br>4,1% | 20<br>3,0% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 12
Uniformidad de la fuente Am-241(886Mc) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>3,2% | 2<br>2,3% | 3<br>1,7% | 4<br>2,2% | 5<br>2,9% |
| 6<br>2,5% | 7<br>2,6% | 8<br>1,6% | 9<br>1,6% | 10<br>2,5% |
| 11<br>1,3% | 12<br>2,5% | 13<br>2,4% | 14<br>2,2% | 15<br>2,9% |
| 16<br>1,0% | 17<br>2,3% | 18<br>3,1% | 19<br>2,6% | 20<br>3,1% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 13

Uniformidad de la fuente Am-241(886Sa) medida con monitor Saphymo detector Centellante

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>3,1% | 2<br>1,0% | 3<br>3,1% | 4<br>5,6% | 5<br>4,1% |
| 6<br>3,6% | 7<br>2,8% | 8<br>1,2% | 9<br>1,3% | 10<br>1,0% |
| 11<br>1,8% | 12<br>3,7% | 13<br>2,9% | 14<br>2,9% | 15<br>1,8% |
| 16<br>3,7% | 17<br>3,4% | 18<br>1,6% | 19<br>6,8% | 20<br>2,2% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 14

Uniformidad de la fuente $^{90}$Sr(435EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>0,9% | 2<br>0,6% | 3<br>1,9% | 4<br>1,0% | 5<br>1,5% |
| 6<br>1,4% | 7<br>0,9% | 8<br>0,9% | 9<br>1,9% | 10<br>1,3% |
| 11<br>0,6% | 12<br>1,6% | 13<br>1,5% | 14<br>1,3% | 15<br>2,0% |
| 16<br>0,4% | 17<br>1,2% | 18<br>1,8% | 19<br>1,4% | 20<br>0,7% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 15

Uniformidad de la fuente $^{14}C$ (892EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>2,1% | 2<br>1,6% | 3<br>0,8% | 4<br>1,9% | 5<br>1,8% |
| 6<br>1,2% | 7<br>1,6% | 8<br>1,0% | 9<br>1,4% | 10<br>1,0% |
| 11<br>1,9% | 12<br>1,0% | 13<br>1,6% | 14<br>0,8% | 15<br>2,1% |
| 16<br>3,0% | 17<br>0,7% | 18<br>2,7% | 19<br>1,4% | 20<br>2,3% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 16

Uniformidad de la fuente Cl-36(433EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>1,1% | 2<br>0,9% | 3<br>1,4% | 4<br>1,6% | 5<br>0,8% |
| 6<br>1,6% | 7<br>0,7% | 8<br>0,5% | 9<br>0,7% | 10<br>0,8% |
| 11<br>1,3% | 12<br>1,7% | 13<br>0,9% | 14<br>1,1% | 15<br>0,4% |
| 16<br>1,8% | 17<br>1,6% | 18<br>1,8% | 19<br>0,8% | 20<br>1,0% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 17

Uniformidad de la fuente Sr-90(435MC) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>1,1% | 2<br>0,6% | 3<br>0,8% | 4<br>0,7% | 5<br>1,2% |
| 6<br>1,6% | 7<br>1,8% | 8<br>1,4% | 9<br>1,4% | 10<br>2,0% |
| 11<br>1,8% | 12<br>1,9% | 13<br>0,9% | 14<br>1,0% | 15<br>1,2% |
| 16<br>1,4% | 17<br>1,2% | 18<br>0,9% | 19<br>1,4% | 20<br>0,8% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 18

Uniformidad de la fuente C-14(892MC) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>1,2% | 2<br>3,7% | 3<br>1,9% | 4<br>3,9% | 5<br>3,7% |
| 6<br>3,9% | 7<br>0,8% | 8<br>4,6% | 9<br>4,1% | 10<br>2,3% |
| 11<br>3,6% | 12<br>4,4% | 13<br>3,9% | 14<br>3,2% | 15<br>4,8% |
| 16<br>2,6% | 17<br>4,0% | 18<br>3,3% | 19<br>2,3% | 20<br>4,1% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 19

Uniformidad de la fuente Cl-36(433Mc) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>2,7% | 2<br>0,9% | 3<br>4,2% | 4<br>0,9% | 5<br>4,4% |
| 6<br>2,6% | 7<br>2,9% | 8<br>2,5% | 9<br>1,9% | 10<br>1,6% |
| 11<br>2,3% | 12<br>0,5% | 13<br>3,1% | 14<br>2,3% | 15<br>1,5% |
| 16<br>2,1% | 17<br>0,8% | 18<br>0,8% | 19<br>1,8% | 20<br>1,5% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 20

Uniformidad de la fuente C-14(492Sa) medida con monitor Saphymo y detector Centellante

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>1,7% | 2<br>1,1% | 3<br>2,9% | 4<br>2,9% | 5<br>5,5% |
| 6<br>1,3% | 7<br>1,3% | 8<br>1,0% | 9<br>1,0% | 10<br>1,6% |
| 11<br>1,3% | 12<br>1,6% | 13<br>4,0% | 14<br>2,5% | 15<br>2,6% |
| 16<br>1,5% | 17<br>3,9% | 18<br>5,1% | 19<br>2,2% | 20<br>2,4% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 21

Uniformidad de la fuente Cl-36(433Sa) medida con monitor Saphymo y detector Centellante

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>1,1% | 2<br>1,8% | 3<br>1,1% | 4<br>0,9% | 5<br>1,7% |
| 6<br>2,5% | 7<br>1,3% | 8<br>1,4% | 9<br>1,4% | 10<br>1,1% |
| 11<br>1,1% | 12<br>0,9% | 13<br>1,3% | 14<br>0,8% | 15<br>0,7% |
| 16<br>1,4% | 17<br>3,4% | 18<br>1,0% | 19<br>1,5% | 20<br>0,9% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

TABLA 22

Uniformidad de la fuente Sr-90(435Sa) medida con monitor Saphymo y detector Centellante

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1<br>1,1% | 2<br>0,4% | 3<br>0,8% | 4<br>0,8% | 5<br>0,9% |
| 6<br>1,3% | 7<br>1,2% | 8<br>1,2% | 9<br>1,5% | 10<br>0,3% |
| 11<br>1,4% | 12<br>0,3% | 13<br>1,0% | 14<br>0,5% | 15<br>1,0% |
| 16<br>0,9% | 17<br>1,2% | 18<br>0,9% | 19<br>1,0% | 20<br>1,1% |

Uniformidad de la fuente en expresada en %
*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a $0^{O}$
*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a $90^{O}$

## 3.4 Resultados del cálculo de la eficiencia de los detectores

Se calculó la eficiencia de los cincos instrumentos que se usaron durante el desarrollo de la tesis, para tres distancias diferentes: 0; 3 y 10 mm y con cada una de las fuentes. Los resultados aparecen reflejados en las tablas de la (23 – 27). Para la calibración de los monitores la distancia de referencia recomendada internacionalmente es de 3 mm. En las tablas antes mencionadas se hace una comparación con las otras eficiencias calculadas.

**Dependencia de la eficiencia con la posición relativa fuente - detector**

**Emisores alfa**

En la tabla 23 para el Electra con detector GP13A centellante con fuente de $^{241}$Am alfa se observa que al aumentar la distancia relativa entre ambos disminuye sensiblemente la eficiencia y la diferencia en % con relación a la de referencia es casi el doble; por lo que el posicionamiento para los radionucleidos emisores de radiación alfa es fundamental en el resultado de la eficiencia y muy influyente en dicho resultado. Se sabe que las partículas se atenúan rápidamente en su interacción con las partículas del aire, esto es debido al poco alcance de sus electrones.

**Emisores beta**

Para la fuentes de $^{90}$Sr+$^{90}$Y y $^{36}$Cl las diferencias no pasan del 6 % en todos los detectores usados, excepto para la eficiencia de la fuente de $^{90}$Sr+$^{90}$Y medida con CoMo170 que el valor alcanza el 25 %. No se pudo determinar la causa de tanta diferencia con relación a los demás detectores que si tienen un comportamiento similar, aunque esta diferencia puede estar asociada a un error en el posicionamiento debido que es un caso muy puntual. Para el $^{14}$C por su baja energía su eficiencia también es muy dependiente de la posición relativa fuente – detector, esta tiene un comportamiento similar en todos los detectores usados para esta investigación, aunque la respuesta de un detector a otro varía. Los emisores beta aunque tienen un alcance mayor que los alfa pero también es apreciable la diferencia de eficiencia en solo unos milímetros.

**Emisores gamma**

Para los emisores gamma también la eficiencia es dependiente de la posición relativa fuente – detector, pero como las distancias tomadas para este estudio son pequeñas en

relación con el alcance que tienen los fotones, la diferencia entre las eficiencias calculadas para estas distancias es muy pequeña. Aunque hay diferencias de un detector a otro para un mismo radionucleido, debido entre otras cosas a que los detectores también son diferentes y la eficiencia depende entre otros factores del tipo de detector. Por ejemplo los detectores gaseosos como el Xenón RXE 260 son mucho más sensibles a los emisores gamma de baja energía Tabla 24 y 25, por lo que su eficiencia es creciente en este orden: $^{137}$Cs, $^{57}$Co, $^{129}$I, $^{241}$Am y $^{238}$Pu.

**Dependencia de la eficiencia de la energía**

Para un mismo detector la eficiencia puede variar de un radionucleido a otro, por ejemplo el detector GP13A del Electra de la Tabla 23, la mayor eficiencia la alcanza el $^{241}$Am gamma y por ese orden continúan otros emisores fotónicos como el $^{57}$Co, y el $^{129}$I, luego les continúan los extremos de energía de los radionucleidos usados como son $^{238}$Pu y $^{137}$Cs cuya eficiencias son muy próximas. Este detector es poco eficiente para la radiación fotónica de baja energía como la del $^{238}$Pu y para los más energéticos como el $^{137}$Cs. Esto corrobora lo detallado en el Capítulo I donde hace un análisis de las ventajas y desventajas de este tipo de detector. Para los emisores beta de baja energía como el $^{14}$C tiene una eficiencia muy baja, sin embargo los beta de mayor energía como el $^{36}$Cl, $^{90}$Sr+$^{90}$Y es mucho más eficiente así como para el $^{241}$Am alfa.

En las tablas 24 y 25 se muestran los resultados de las eficiencias de dos detectores de xenón del mismo fabricante y similares en sus dimensiones y composición. Como se puede apreciar las eficiencias calculadas también varían de un radionucleido a otro como en casos analizados anteriormente, pero no hay mucha diferencia entre los resultados obtenidos de un instrumento a otro para un mismo radionucleido; en algunos radionucleidos los resultados son similares. Estos detectores tienen una alta eficiencia para los electrones mayores de 60 keV como el $^{36}$Cl y el $^{90}$Sr+$^{90}$Y y baja eficiencia para los electrones con energía menor de 60 keV y para los fotones con energías mayores que 50 keV tales como $^{241}$Am, $^{57}$Co y el $^{137}$Cs.

Los resultados del Saphymo CoMo170 aparecen reflejados en la Tabla 26, este se comporta de la misma manera que el resto de los detectores en cuanto a la variación de su respuesta en dependencia del radionucleido. La mayor eficiencia la alcanzan los emisores beta de mayor energía tales como el $^{36}$Cl y el $^{90}$Sr+$^{90}$Y, pero muy baja eficiencia para los menos energéticos como el $^{14}$C. Por otra parte para los emisores

gamma de mayor energía, este tiene una respuesta muy baja, en la medida que disminuye la energía de estos aumenta la eficiencia del detector, por lo que la menor eficiencia la tiene el $^{137}Cs$ debido a que es el más energético.

Los resultados de las eficiencias calculadas para este detector aparecen en la tabla 27. Este es un instrumento atípico porque la magnitud que mide es el flujo en ($min^{-1}.cm^{-2}$), pero tiene una alta eficiencia para todos los emisores beta y para los alfa como el $^{241}Am$. Tienen una eficiencia muy baja para los emisores fotónicos con la excepción del $^{238}Pu$. Llama la atención que la eficiencia de este detector para los emisores beta es más del 100 %, esto significa que el detector está registrando más conteo de lo que emite la fuente. En la revisión del manual de operación del instrumento se pudo constatar que esto es debido a un factor de calibración introducido por el fabricante: $B = f(N_0)$

Donde $N_0$ es el valor medio de la tasa de conteo calculada para el tiempo de medición, y $f(N_0)$ es un polinomio cuyo coeficiente depende del tipo de detector que está conectado. Con este monitor se hizo un ejercicio de intercomparación con el Laboratorio Nacional de Metrología de las Radiaciones Ionizantes (LNMRI) del Instituto de Radioprotección y Dosimetría de Brasil y los resultados serán expresados más adelante.

**Tabla 23**

**Instrumento:** Electra 1B **No. de serie:** 4407

| Fuente/Código/Radiación | Eficiencia del instrumento[1] (%) DFD = 0 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 3 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 10 mm | Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 3 - 0 | 3 -10 |
| $^{241}Am$/NW886/α | 43.3 ± 4.3 | 37.7 ± 3.8 | 26.1 ± 2.3 | 14.9 | 30.8 |
| $^{90}Sr+^{90}Y$/OE435/β | 31.9 ± 2.8 | 32.4 ± 2.9 | 31.8 ± 2.8 | 1.5 | 1.9 |
| $^{36}Cl$/OE433/β | 37.4 ± 3.3 | 38.4 ± 3.4 | 37.1 ± 3.3 | 2.6 | 3.4 |
| $^{14}C$/NW892/β | 15.9 ± 1.4 | 14.2 ± 1.7 | 10.9 ± 1.0 | 12.0 | 23.3 |
| $^{241}Am$/NW887/γ | 81.2 ± 8.7 | 78.5 ± 8.5 | 79.6 ± 8.6 | 3.4 | 1.4 |
| $^{129}I$/NW891/γ | 48.9 ± 6.0 | 39.9 ± 4.9 | 40.2 ± 4.9 | 22.6 | 0.8 |
| $^{238}Pu$/NW888/γ | 5.5 ± 0.8 | 4.9 ± 0.7 | 4.6 ± 0.7 | 12.2 | 6.1 |
| $^{57}Co$/NW890/γ | 54.2 ± 5.9 | 48.6 ± 5.3 | 47.6 ± 5.1 | 11.5 | 2.1 |
| $^{137}Cs$/NW889/γ | 5.6 ± 0.8 | 7.6 ± 1.1 | 7.1 ± 1.0 | 26.3 | 6.5 |

[3]*Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).*

**Tabla 24**

**Instrumento:** Instrumento: MicroCont II No. de serie: 1251

| Fuente/Código/ Radiación | Eficiencia del instrumento[1] (%) DFD = 0 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 3 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 10 mm | Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 3 - 0 | 3 -10 |
| $^{241}$Am/NW886/ α | 33.7 ± 6.0 | 28.8 ± 2.5 | 22.4 ± 2.0 | 17.0 | 22.2 |
| $^{90}$Sr+$^{90}$Y/OE435/β | 52.0 ± 4.6 | 49.5 ± 4.6 | 48.0 ± 4.2 | 5.0 | 3.0 |
| $^{36}$Cl/OE433/β | 49.5 ± 4.3 | 48.4 ± 4.3 | 47.0 ± 4.1 | 2.2 | 2.8 |
| $^{14}$C/NW892/β | 9.9 ± 0.9 | 7.5 ± 0.7 | 7.3 ± 0.6 | 32.0 | 2.7 |
| $^{241}$Am/NW887/ γ | 8.4 ± 0.9 | 8.4 ± 0.9 | 7.9 ± 0.9 | 0.0 | 6.0 |
| $^{129}$I/NW891/γ | 6.5 ± 0.8 | 6.5 ± 0.8 | 6.3 ± 0.8 | 0.0 | 3.0 |
| $^{238}$Pu/NW888/γ | 19.1 ± 2.8 | 19.5 ± 2.8 | 18.9 ± 2.8 | 2.1 | 3.0 |
| $^{57}$Co/NW890/γ | 2.3 ± 0.2 | 2.2 ± 0.3 | 2.1 ± 0.2 | 4.5 | 4.5 |
| $^{137}$Cs/NW889/γ | 1.3 ± 0.2 | 1.3 ± 0.2 | 1.2 ± 0.2 | 0.0 | 7.7 |

[3]*Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).*

**Tabla 25**

**Instrumento:** MicroCont No. de serie: 930

| Fuente/Código/ Radiación | Eficiencia del instrumento[1] (%) DFD = 0 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 3 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 10 mm | Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 3 - 0 | 3 -10 |
| $^{241}$Am/NW886/ α | 29.4 ± 2.6 | 24.3 ± 2.1 | 14.6±1.3 | 21,0 | 39.9 |
| $^{90}$Sr+$^{90}$Y/OE435/β | 54.6 ± 4.8 | 51.6 ± 4.6 | 50.6 ± 4.4 | 5.8 | 1.9 |
| $^{36}$Cl/OE433/β | 50.1 ± 4.4 | 48.6 ± 4.3 | 47.3 ± 4.2 | 3.1 | 2.7 |
| $^{14}$C/NW892/β | 7.1 ± 0.6 | 6.6 ± 0.6 | 5.8 ± 0.5 | 7.6 | 12.1 |
| $^{241}$Am/NW887/ γ | 8.3 ± 0.9 | 8.3 ± 0.9 | 8.0 ± 0.9 | 0.0 | 3.6 |
| $^{129}$I/NW891/γ | 6.6 ± 0.8 | 6.7 ± 0.8 | 6.5 ± 0.8 | 2.5 | 3.0 |
| $^{238}$Pu/NW888/γ | 19.8 ± 2.9 | 19.3 ± 2.8 | 19.3 ± 2.8 | 2.6 | 0.0 |
| $^{57}$Co/NW890/γ | 2.6 ± 0.3 | 2.5 ± 0.3 | 2.3 ± 0.2 | 4.0 | 8.0 |
| $^{137}$Cs/NW889/γ | 1.1 ± 0.2 | 1.3 ± 0.2 | 1.2 ± 0.2 | 15,4 | 7.7 |

[3]*Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).*

**Tabla 26**

**Instrumento:** CoMo170 No. de serie: 875

| Fuente/Código/ Radiación | Eficiencia del instrumento[1] (%) DFD = 0 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 3 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 10 mm | Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 3 - 0 | 3 -10 |
| $^{241}$Am/NW886/ α | 45.4 ± 4.0 | 44.0 ± 5.2 | 22.0 ± 2.0 | 3.2 | 50.0 |
| $^{90}$Sr+$^{90}$Y/OE435/β | 66.5 ± 5.8.8 | 65.1 ± 5.7 | 48.8 ± 4.8 | 2.2 | 25.0 |
| $^{36}$Cl/OE433/β | 66.8 ± 6.0 | 65.5 ± 5.8 | 64.0 ± 5.6 | 2.0 | 2.3 |
| $^{14}$C/NW892/β | 27.2 ± 2.4 | 24.9 ± 2.3 | 18.9 ± 1.7 | 9.2 | 24.1 |
| $^{241}$Am/NW887/ γ | 1.5 ± 0.2 | 1.5 ± 0.2 | 1.4 ± 0.2 | 0.0 | 6.7 |
| $^{129}$I/NW891/γ | 5.8 ± 0.7 | 5.7 ± 0.7 | 5.2 ± 0.7 | 1.8 | 8.8 |
| $^{238}$Pu/NW888/γ | 12.8 ± 1.9 | 12.1 ± 1.8 | 12.2 ± 1.8 | 5.8 | 0.8 |
| $^{57}$Co/NW890/γ | 0.8 ± 0.1 | 0.7 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 | 14.3 | 14.3 |
| $^{137}$Cs/NW889/γ | 1.7 ± 0.2 | 1.7 ± 0.3 | 1.5 ± 0.2 | 0.0 | 11.8 |

[3]*Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).*

**Tabla 27**

**Instrumento:** PM-1402M No. de serie: N042210805

| Fuente/Código/ Radiación | Eficiencia del instrumento[1] (%) DFD = 0 mm | *Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 3 mm | Eficiencia del instrumento[1] (%)DFD = 10 mm | Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 3 - 0 | 3 -10 |
| $^{241}$Am/NW886/ α | 96.6 ± 8.8 | 83.4 ± 7.3 | 39.6 ± 3.6 | 21.0 | 39.9 |
| $^{90}$Sr+$^{90}$Y/OE435/β | 141.8 ± 12.7 | 139.1 ± 12.2 | 132.3 ± 11.6 | 1.9 | 1.9 |
| $^{36}$Cl/OE433/β | 156.9 ± 13.9 | 153.7 ± 13.5 | 143.7 ± 12.6 | 3.1 | 2.7 |
| $^{14}$C/NW892/β | 154.3 ± 13.6 | 140.8 ± 12.4 | 100.2 ± 8.8 | 7.6 | 12.1 |
| $^{241}$Am/NW887/ γ | 2.2 ± 0.2 | 1.7 ± 0.2 | 1.8 ± 0.2 | 0.0 | 3.6 |
| $^{129}$I/NW891/γ | 5.3 ± 0.7 | 4.9 ± 0.6 | 4.6 ± 0.6 | 1.5 | 3.0 |
| $^{238}$Pu/NW888/γ | 24.4 ± 3.6 | 24.8 ± 3.4 | 23.5 ± 3.4 | 2.6 | 0.0 |
| $^{57}$Co/NW890/γ | 1.5 ± 0.2 | 1.4 ± 0.2 | 1.4 ± 0.2 | 4.0 | 8.0 |
| $^{137}$Cs/NW889/γ | 1.9 ± 0.3 | 1.6 ± 0.2 | 1.6 ± 0.2 | 15.4 | 7.7 |

[3]*Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).*

## 3.5 Resultados de la metodología implementada para la calibración de monitores de contaminación superficial.

La metodología implementada permitió la calibración por primera vez en el país de monitores de **contaminación superficial**. Esta calibración se realiza en términos de eficiencia, la eficiencia del instrumento fue determinada en el laboratorio de calibración para diferentes tipos de radiaciones y grupos de energías, utilizando fuentes de referencia para la radiación alfa, beta y gamma. Los factores de calibración del instrumento específico para los radionucleidos de interés, son calculados posteriormente ponderando los valores de eficiencia previamente obtenidos para cada tipo de radiación y grupo de energía con las probabilidades de emisión de los diferentes tipos de radiaciones del radionucleido en cuestión. Los 5 instrumentos usados durante el período de investigación fueron calibrados utilizando esta metodología y los certificados que evidencian los resultados de la **calibración** aparecen reflejados en los Anexos del (3 - 7). En los resultados de la **calibración** expresados en el certificado aparecen los datos de las fuentes patrones, el valor convencionalmente verdadero del cociente de la tasa de emisión superficial y el área de la fuente patrón, el valor medio de las indicaciones del instrumento corregido al fondo radiactivo más su desviación estándar y la eficiencia del instrumento expresada en % con su respectiva incertidumbre expandida para un nivel del 95 %.

En el reporte del certificado (anexos del 3 - 7) en el acápite 4 es especificado el método de calibración y las características de los patrones usados, así como, en el 5 se describe la geometría usada para el proceso y algunas especificaciones que pueden ser de importancia para el uso adecuado del factor de **calibración** recomendado basado en la norma ISO 7503-3 “Evaluación de **contaminación superficial**”. La trazabilidad de las mediciones hasta el Sistema Internacional de Unidades solo se puede garantizar en término de eficiencia, debido a que la **calibración** de los patrones están dados en esa magnitud. Sin embargo el usuario necesita convertir la tasa de conteo en $Bq/cm^2$, para este fin por recomendaciones de la ISO 7503-3, el laboratorio calcula un factor de **calibración** que le permite al usuario hacer la evaluación de la **contaminación superficial** en término de actividad superficial como están indicadas normas. Este factor es suministrado al usuario en un anexo al certificado de calibración, (3 – 7 epig. 7) en este aparecen los resultados del factor de **calibración** de cada uno de los radionucleidos que el usuario utiliza en su práctica, estos están expresados en ($Bq.cm^{-2}.s$) y ($Bq.cm^{-2}.min$) según las indicaciones del instrumento con sus respectivas incertidumbres

estándar expandida para un nivel de confianza del 95 % según recomendaciones de la ISO 7503-3. El usuario en la práctica para hacer uso del factor para la conversión de $s^{-1}$ a $Bq/cm^{-2}$, solo es suficiente con multiplicar la tasa de conteo neta (corregida al fondo) por el factor del radionucleido seleccionado.

En el anexo al certificado de calibración el laboratorio aclara que estas recomendaciones no forman parte del contenido del certificado, sino una orientación para la evaluación de la **contaminación superficial** basada en la norma ISO 7503-3 "Evaluación de **contaminación superficial**". El laboratorio solo está comprometido con el contenido del certificado de calibración, porque lo que es trazable hasta el Sistema Internacional de Unidades es la eficiencia.

La metodología implementada tuvo como resultado el establecimiento de un servicio nacional de **calibración** de monitores de contaminación por primera vez en el país. Este servicio ha sido brindado a un grupo importante de usuarios como aparece reflejado en el anexo 8. El 62 % de los usuarios beneficiados pertenecen al Ministerio de Salud Pública, el 15 % son servicios internos brindados al Grupo de Gestión de Desechos del CPHR y el resto del % a otras instituciones campo industrial y de investigaciones del país. Como se puede apreciar en este análisis de los resultados, los principales usuarios beneficiados son los departamentos de Medicina Nuclear del país, por lo que la introducción de este resultado científico tiene una incidencia directa en el control radiológico de los programas de protección radiológica de los pacientes, trabajadores ocupacionalmente expuestos y público en general del Ministerio de Salud Pública y de otras instituciones. Esto posibilitará la cuantificación de las contaminaciones superficiales y el establecimiento de niveles de referencia adecuados y optimizados para la adopción de medidas encaminadas a proteger a los trabajadores ocupacionalmente expuestos y miembros del público, en pleno cumplimiento de lo estipulado en las regulaciones nacionales de Seguridad Radiológica.

El poder cuantificar los niveles de **contaminación superficial** tendrá un impacto científico importante, esto permitirá una mejor comprensión y validación de los modelos de evaluación que predicen la transferencia de los radionucleidos a las superficies y el hombre, tanto en condiciones de operación normal como ante la ocurrencia de sucesos radiológicos.

El anexo 8 es una evidencia de la implementación del servicio, pues este constituye el registro de entrada de muestra que responde a las solicitudes del servicio hecha por los usuarios.

Una vez implementado el servicio, a todos los usuarios se les hizo llegar una carta (anexo 9) con el objetivo de esta comunicación y dándoles algunos detalles de las características de este nuevo servicio, el mismo ha tenido aceptación entre los usuarios.

El equipamiento adquirido por el proyecto OIEA CUB/3/002 ¨Assuring and demostranting the safety of radiactive waste magnagement in Cuba¨ para el país por concepto de equipamiento y de capacitación del personal el país ahorro una inversión de 25294 €. En el país hay aproximadamente 22 departamentos de Medicina Nuclear en las instituciones de salud pública y otro tanto de usuarios en la industria y la investigación. Cada calibración de un instrumento en el área cuesta alrededor de 700 €, y cada instrumento necesita al menos una **calibración** anual. Por lo tanto si el país tuviera que calibrar los equipos fuera de su territorio tendría que invertir anualmente aproximadamente 30800 € sin contar el costo de la transportación y el riesgo que se corre con la rotura o extravía del mismo. Por lo que la implementación del servicio en el país constituye un ahorro considerable de recursos humanos y materiales y garantiza la sostenibilidad de este servicio a un grupo importante de instituciones usuarias.

## 3.6 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología.

**Análisis del resultado de la intercomparación de los procedimientos de calibración de Cuba – Brasil para monitores de contaminación superficial.**

Los laboratorios utilizan métodos de calibración distintos, el Laboratorio Nacional de Metrología de las Radiaciones Ionizantes (LNMRI) del Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD) de Brasil, utiliza el método del posicionamiento central descrito anteriormente y el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD) el método de las posiciones sucesivas descrito en el capítulo II. Los resultados de la comparación entre ambos laboratorios se muestran en la tabla 2 del anexo 10. Estos resultados fueron evaluados usando la metodología recomendada en la ISO/IEC 43-1. El número $E_n$ fue seleccionado para la evaluación y considerar que los resultados son satisfactorios cuando $E_n<1$ y insatisfactorios cuando $E_n>1$. El número $E_n$ combina la influencia de la

diferencia entre los valores de las eficiencias reportadas por los laboratorios y las incertidumbres. El número $E_n$ se calcula por la siguiente ecuación:

$$E_n = \frac{\varepsilon_{iIRD} - \varepsilon_{iCPHR}}{\sqrt{U_{iIRD}^2 + U_{iCPHR}^2}}$$

$\varepsilon_{iIRD}$ : Eficiencia reportada por el IRD

$\varepsilon_{iCPHR}$ : Eficiencia reportada por el CPHR

$U_{iIRD}^2$ : incertidumbre estándar combinada reportada por el IRD para un nivel de confianza del 95 %.

$U_{iCPHR}^2$ :incertidumbre estándar combinada reportada por el CPHR para un nivel de confianza del 95 %.

Los resultados muestran que los valores de ambos laboratorios son comparables excepto el $^{36}$Cl porque el número $E_n$>1. El resultado del $^{36}$Cl fue rechazado y se inició la investigación del problema con el objetivo de aclarar y reevaluarlo. Como resultado de la investigación realizada se concluyó que los procedimientos para la **calibración** de monitores de **contaminación superficial** son similares. El sustento de esta afirmación es el resultado del ejercicio de comparación entre ambos laboratorios en términos de tasa de emisión superficial. El número $E_n$ según la ISO/IEC 43-1 muestra los resultados satisfactorios para tres fuentes comunes e insatisfactorio solo para el $^{36}$Cl. La investigación de los resultados insatisfactorios condujo a una investigación más profunda de la determinación de la eficiencia del monitor con una fuente de $^{137}$Cs, usando el método simple y el de multifuentes. La concordancia de los dos métodos, cuando fue utilizada la eficiencia para el $^{36}$Cl determinada por el CPHR, se deduce que los resultados del CPHR para esta fuente pueden ser considerados como satisfactorios. No obstante se necesita hacer una investigación más profunda en espera de las conclusiones finales.

Posteriormente a la intercomparación de los procedimientos de calibración de Cuba – Brasil para monitores de **contaminación superficial**, se calibró el instrumento que se utilizó para el ejercicio de intercomparación usando la metodología implementada en el LSCD del CPHR. El resultado de esta **calibración** se comparó con los resultados del

ejercicio de intercomparación, siguiendo el mismo criterio de aceptación. En las tablas de la (28 - 30) se muestran los resultados de esta comparación, en la tabla 28 aparecen los resultados intercomparados y analizados anteriormente.

En tabla 29 se comparan los resultados obtenidos del ejercicio de intercomparación del IRD con los obtenidos en el certificado de **calibración** del CPHR[1], como se puede apreciar todas las fuentes cumplen el criterio de aceptación excepto el $^{36}$Cl. En la tabla 28 se comparan los resultados obtenidos por el CPHR en el ejercicio de intercomparación y los resultados obtenidos en el certificado de **calibración** del CPHR[1] como se puede observar todas las fuentes cumplen el criterio de aceptación $E_n$<1por lo que los resultados se consideran satisfactorios según la ISO/IEC 43-1, este hecho demuestra la reproducibilidad de la metodología bajo otras condiciones.

Tabla 28. Resultado del ejercicio comparación entre el IRD y el CPHR

| Fuente | Eficiencia IRD $\varepsilon_{i\ IRD} \pm u_{i\ IRD}$ | Eficiencia CPHR $\varepsilon_{i\ CPHR} \pm u_{iCPHR}$ | En |
|---|---|---|---|
| $^{90}$Sr | 136,5 ± 12,6 | 138,0 ± 12,1 | 0,1 |
| $^{36}$Cl | 180,8 ± 19,5 | 152,7 ± 13,4 | 1,2 |
| $^{14}$C | 158,0 ± 14,5 | 140,9 ± 12,4 | 0,9 |
| $^{241}$Am(α) | 81,1 ± 7,5 | 83,4 ± 7,3 | 0,2 |

Tabla 29. Resultado de la comparación entre el IRD y los resultados obtenidos en el certificado de calibración del CPHR[1]

| Fuente | Eficiencia IRD $\varepsilon_{i\ IRD} \pm u_{i\ IRD}$ | Eficiencia CPHR[1] $\varepsilon_{i\ CPHR} \pm u_{iCPHR}$ | En |
|---|---|---|---|
| $^{90}$Sr | 136,5 ± 12,6 | 139,1 ± 13,9 | 0,1 |
| $^{36}$Cl | 180,8 ± 19,5 | 153,7 ± 13,4 | 1,1 |
| $^{14}$C | 158,0 ± 14,5 | 140,8 ± 12,4 | 0,9 |
| $^{241}$Am(α) | 81,1 ± 7,5 | 83,4 ± 7,3 | 0,2 |

CPHR[1] es la calibración del instrumento por el CPHR posterior al ejercicio de intercomparación

Tabla 30. Resultado de la comparación entre el CPHR y los resultados obtenidos en el certificado de calibración del CPHR[1]

| Fuente | Eficiencia CPHR $\varepsilon_{i\ CPHR} \pm u_{iCPHR}$ | Eficiencia CPHR[1] $\varepsilon_{i\ CPHR} \pm u_{iCPHR}$ | En |
|---|---|---|---|
| $^{90}$Sr | 138,0 ± 12,1 | 139,1 ± 13,9 | 0,06 |
| $^{36}$Cl | 152,7 ± 13,4 | 153,7 ± 13,4 | 0,05 |
| $^{14}$C | 140,9 ± 12,4 | 140,8 ± 12,4 | 0,01 |
| $^{241}$Am(α) | 83,4 ± 7,3 | 83,4 ± 7,3 | 0,00 |

CPHR[1] es la calibración del instrumento por el CPHR posterior al ejercicio de intercomparación

**Análisis de la factibilidad de la metodología implementada.**

La factibilidad de la metodología implementada fue evaluada por el experto denominado por el Organismo Internacional de Energía Atómica en el marco del proyecto OIEA CUB/3/002 ¨Assuring and demostranting the safety of radiactive waste magnagement in Cuba¨. El criterio de experto está emitido en el anexo 12, donde expresa que los buenos resultados obtenidos han demostrado la calidad y rigor científico de la presente tesis y asegurarán la sostenibilidad del servicio implementado para los clientes potenciales del País y de América Latina.

## 3.7 Comparación entre el método del posicionamiento central y el de la posiciones contiguas

Las comparaciones de los métodos de calibración se hicieron usando la metodología recomendada en la ISO/IEC 43-1, por lo que el criterio de aceptación es el mismo que se uso en el epígrafe 3.6. Los resultados de la comparación entre ambos métodos se muestran en las tablas de la (43 – 49) del anexo 25.

En la tabla 43 aparecen reflejados los resultados de la comparación de los métodos para el caso particular en que el área del detector (21.2 $cm^2$) es menor que el área de la fuente (10 x 10) cm como aparece reflejado en la figura 23. Se puede que no hay diferencias significativas entre las eficiencias comparadas de ambos métodos, el número $E_{n,} < 1$ para todas las fuentes comparadas, es decir, se cumple el criterio de aceptación.

En la tabla 44 aparecen reflejados los resultados de la comparación de los métodos para el caso particular en que el área del detector (6.7 x 15) cm es aproximadamente igual al área activa de la fuente (10 x 10) cm, en la figura 24 se observar lo descrito en este párrafo. En este caso el detector tiene forma rectangular, es más estrecho que la fuente, pero su longitud es mayor. Se hizo coincidir el centro geométrico de la fuente con el del detector y se midió la tasa de conteo en esa posición y en las posiciones sucesivas a ambos lados de la posición central hasta cubrir toda el área sensible del detector. Como resultado se obtuvo que no existe diferencias significativas entre las eficiencias comparadas de ambos métodos, excepto $^{137}Cs$ que no cumple con el criterio de aceptación. Las causas no fueron determinadas, pero pudieran estar relacionadas con el posicionamiento del detector. Recomendamos que esta incongruencia sea nuevamente evaluada. En la tabla 45 se comparó el método del posicionamiento central y el de la

posiciones contiguas para este mismo monitor. Los resultados obtenidos difieren grandemente, por lo que no son comparables los métodos. En todos los casos $E_{n,} > 1$ por lo que este resultado no es aceptado.

En la tabla tabla 48 aparecen los resultados de la comparación entre el método del posicionamiento (4, 5 y 6) y el de la posiciones contiguas para el monitor Saphymo / 875 cuya área sensible (10 x 17) cm, es algo mayor que el área activa de la fuente (10 x 10) cm, como aparece representado en la figura 25. Los resultados obtenidos muestran que no existen diferencias significativas entre las eficiencias comparadas entre ambos métodos, excepto para el $^{137}Cs$ que no cumple con el criterio de aceptación. Este resultado para el Cesio pudiera estar relacionado con el posicionamiento del detector. En la tabla 49 se comparó el método del posicionamiento central y el de la posiciones contiguas para este mismo monitor. En los resultados obtenidos hay diferencias significativas entre los métodos, por lo que no son comparables. En todos los casos $E_{n,} > 1$ por lo que este resultado no es aceptado.

En la tabla 46 aparecen los resultados de la comparación entre método del posicionamiento (4, 5 y 6) y el de la posiciones contiguas para el monitor MicroCont II/1251 cuya área sensible (21.1 x 11.0) cm, es mucho mayor que el área activa de la fuente (10 x 10) cm, como aparece reflejado en la figura 26. Como resultado se obtuvo que existen diferencias significativas entre las eficiencias comparadas de ambos métodos, excepto $^{238}Pu$ que cumple con el criterio de aceptación. Este resultado para el plutonio pudiera estar relacionado con el posicionamiento del detector. Este resultado no es aceptado. En la tabla 47 se comparó el método del posicionamiento central y el de la posiciones contiguas para este mismo monitor. Los resultados obtenidos difieren grandemente, por lo que no son comparables los métodos. En todos los casos $E_{n,} > 1$ por lo que este resultado no es aceptado.

## 3.8 Metodología implementada para la calibración de monitores de contaminación superficial.

**Método de calibración.**

Método de comparación de las indicaciones del instrumento con los valores convencionalmente verdaderos de la tasa de emisión superficial de la fuente plana patrón según PR/LSCD/037 y en concordancia con el reporte técnico No. 16 del OIEA.

Se simula una geometría semiinfinita de irradiación según recomendaciones del reporte CIRM 6 de la NPL. Las fuentes patrones alfa y beta fueron calibradas en el período 16/12/05-06/06/06 por Deutscher Klibrierdienst (DKS), trazable al laboratorio primario Phisicalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) de Alemania. Las fuentes patrones gamma fueron calibradas en el período 27/02/06-01/03/06 por Dosimetry and Radiological Metrology Service (DRMS), trazable al laboratorio primario Nacional Physical Laboratory (NPL) del Reino Unido.

El método de las porciones contiguas se realiza determinando la respuesta del detector a una fuente de **calibración** colocada en posiciones adyacentes debajo del monitor, sin superponerse, hasta que toda el área del detector sea barrida (Fig. 1). Las respuestas son entonces corregidas al fondo y sumadas juntas para dar la respuesta total esperada de una fuente de calibración de área igual al área total barrida por las posiciones individuales de la fuente.

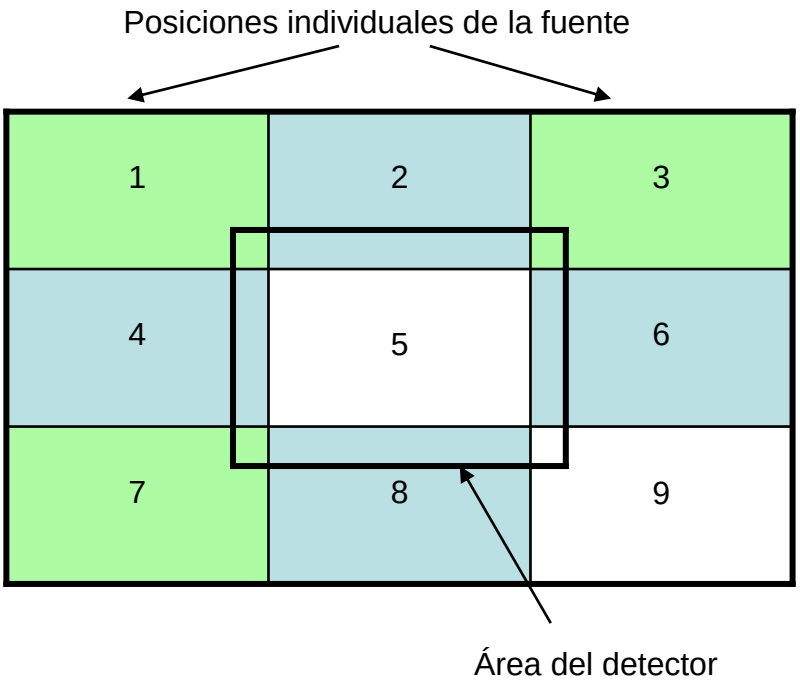



Figura 1: Representación gráfica del método de las posiciones contiguas

**Preparación:**

- Trazar una cuadrícula adyacente pero que las posiciones de la fuente no se solapen (Fig. 1), extendiendo en todas las direcciones más allá del área del detector escogida, determinado por el contorno del detector.
- Fijar el detector concéntricamente sobre la cuadrícula (con el centro del detector coincidiendo con el centro de la posición central de la fuente), de manera que la distancia duente detector sea de 3 mm.

**Mediciones**

- anotar la tasa de conteo del fondo
- colocar la fuente en la primera posición sobre la cuadrícula, asegurando que esta quede dentro de los límites de la línea.
- medir la respuesta del detector y anotar el valor observado
- valcular el valor medio de la respuesta del detector
- mover la fuente para la próxima posición sobre la cuadrícula, realizar mediciones y calcular el valor medio

- continuar las mediciones hasta que todas las posiciones sobre las cuadrículas sean estudiadas
- anotar la tasa de conteo del fondo

**Análisis**

- calcular la media de la tasa de conteo del fondo medido ($B_i$)
- restar la media del fondo ($B_b$), de cada media de la tasa de conteo observado ($B_i$) con la fuente en cada una de las posiciones sobre la cuadrícula.

La eficiencia del instrumento es determinada comparando su respuesta total con la tasa de emisión superficial corregida por el decaimiento de la fuente, por unidad de área de la fuente de calibración y por el área de la ventana del detector del instrumento. Esta puede ser expresada algebraicamente como sigue:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{I=1}^{n}\left(B_i - B_b\right)}{\frac{q_{2\pi}}{w_s}.w} \qquad (3.1)$$

donde $\varepsilon$ es la eficiencia del detector

$B_i$ es la respuesta del detector en posiciones i de la fuente ($s^{-1}$ )

$B_b$ es el fondo ($s^{-1}$ )

$q_{2\pi}$ es la tasa de emisión superficial ($s^{-1}$ )

$W_s$ área de la fuente ($cm^{-2}$)

$W$ área del detector ($cm^{-2}$)

**Cálculo de la incertidumbre expandida de las mediciones para el método de las posiciones contiguas.**

Este cálculo se realiza como aparece reflejado en el Capítulo II epígrafe 2.4

**Métodos para la evaluación de contaminación de superficie**

Una contaminación de superficie puede ser evaluada por métodos de mediciones directas o indirectas. Las mediciones directas son llevadas a cabo con medidores y monitores de contaminación superficial .

**Cálculo de la actividad superficial**

La actividad superficial, expresada en $Bq.cm^{-2}$, puede obtenerse multiplicando la lectura neta del instrumento de medición por un factor de calibración que dependerá del (los) radionucleido (s) contaminante (s):

$$A_S = \left(r - r_B\right) \cdot FC \qquad (3.2)$$

Donde:

$A_S$ es la actividad superficial evaluada, expresada en $Bq.cm^{-2}$,

r es la indicación del instrumento de medición en $s^{-1}$,

$r_B$ es la lectura de fondo del instrumento de medición en $s^{-1}$,

FC es el factor de calibración del instrumento de medición para el radionucleido a evaluar, expresado en $s.Bq.cm^{-2}$.

**Cálculo del factor de calibración para un radionucleido determinado**

Según la Norma ISO 7503:2005 [3], el factor de calibración del instrumento de medición para un radionucleido en particular puede calcularse a partir de su esquema de desintegración y de la eficiencia del instrumento para los diferentes tipos de radiaciones emitidos por dicho radionucleido, mediante la expresión:

$$FC = \frac{1}{\left(\sum_j \varepsilon_{i,j} \cdot \gamma_j \cdot \varepsilon_{s,j}\right) \cdot W} \qquad (3.3)$$

Donde:

$\varepsilon_{i,j}$ es la eficiencia del instrumento, dada en el certificado de **calibración**, para la radiación “j”. Expresa la cantidad de conteos netos del detector entre la cantidad de partículas del tipo “j” que emergen de la cara frontal de la fuente, para un área de la fuente igual al área de la ventana activa del detector y para condiciones geométricas preestablecidas. Los tipos de radiación “j” a considerar para la determinación de la eficiencia de los instrumentos de medición son los definidos por la Norma ISO 7503:

- Radiación alfa
- Radiación beta de energía media en el intervalo de 40.0 keV a 70.0 keV y electrones con energía en el intervalo de 40.0 keV a 70.0 keV,
- Radiación beta de energía media en el intervalo de 70.0 keV a 140.0 keV y electrones con energía en el intervalo de 70.0 keV a 140.0 keV,
- Radiación beta de energía media en el intervalo de 140.0 keV a 400.0 keV y electrones con energía en el intervalo de 140.0 keV a 400.0 keV,
- Radiación beta de energía media superior a 400.0 keV y electrones con energía superior a 400.0 keV,
- Fotones de energía en el intervalo de 5.0 keV a 15.0 keV,
- Fotones de energía en el intervalo de 15.0 keV a 90.0 keV,
- Fotones de energía en el intervalo de 90.0 keV a 300 keV, y
- Fotones de energía superior a 300.0 keV.

$\gamma_j$ es la probabilidad de emisión de la radiación "j" por desintegración del elemento radiactivo, expresada en $s^{-1}Bq^{-1}$. Los valores de estos parámetros pueden ser deducidos a partir de bases de datos nucleares actualizadas, como la biblioteca ENSDF del Centro Nacional de Datos Nucleares (RSIC) de los Laboratorios Nacionales de Brookhaven en los Estados Unidos [4]. La Tabla 1 resume los valores de $\gamma_j$ para algunos de los radionucleidos de uso más frecuente.

$\varepsilon_{S,j}$ es la eficiencia de la fuente de contaminación para la radiación "j". Indica la cantidad de partículas de la radiación "j" que emerge de la cara frontal de la fuente por cada partícula de la radiación "j" emitida por la fuente. Cuando no se tengan datos específicos sobre las fuentes de contaminación sujetas a medición, pueden utilizarse los valores de $\varepsilon_{S,j}$ recomendados en la Norma ISO 7503:2005:

- $\varepsilon_{S,j}$ = 0.50 para la radiación beta de energía media > 140.0 keV, para los electrones con energía > 140.0 keV y para la radiación gamma,
- $\varepsilon_{S,j}$ = 0.25 para la radiación beta de energía media entre 40.0 keV y 140.0 keV, para los electrones con energía entre 40.0 keV y 140.0 keV y para la radiación alfa.

W es el área de la ventana sensible del instrumento de medición, expresada en $cm^2$.

Tabla 1: Probabilidades de emisión en $s^{-1}Bq^{-1}$ para los grupos de radiaciones definidos en la Norma ISO 7503:2005, en radionucleidos de uso frecuente

| Radionucleido | Grupos de radiaciones según ISO 7503:2005 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | α | β y $e^-$ 40 – keV | β y $e^-$ 70 – 1 keV | β y $e^-$ 140 - 4 keV | β y $e^-$ >400 keV | Fotones 5 – 15 keV | Fotones 15 – 90 keV | Fotones 90 - 300 keV | Fotones >300 keV |
| $^{14}C$ | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| $^{32}P$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| $^{60}Co$ | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 2.000 |
| $^{90}Sr/^{90}Y$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| $^{99}Mo$ | 0.000 | 0.001 | 0.178 | 0.023 | 0.827 | 0.000 | 0.040 | 0.100 | 0.190 |
| $^{99m}Tc$ | 0.000 | 0.000 | 0.109 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.073 | 0.891 | 0.000 |
| $^{125}I$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.443 | 0.000 | 0.000 |
| $^{131}I$ | 0.000 | 0.057 | 0.086 | 0.918 | 0.000 | 0.006 | 0.074 | 0.063 | 0.913 |
| $^{137}Cs/^{137m}Ba$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.946 | 0.149 | 0.000 | 0.069 | 0.000 | 0.851 |
| $^{177}Lu$ | 0.000 | 0.178 | 0.183 | 0.794 | 0.000 | 0.033 | 0.058 | 0.176 | 0.002 |
| $^{188}Re$ | 0.000 | 0.003 | 0.051 | 0.088 | 0.983 | 0.031 | 0.047 | 0.150 | 0.043 |
| $^{201}Tl$ | 0.000 | 0.108 | 0.208 | 0.034 | 0.000 | 0.444 | 0.968 | 0.128 | 0.000 |
| $^{241}Am$ | 1.000 | 0.107 | 0.028 | 0.000 | 0.000 | 0.427 | 0.386 | 0.000 | 0.000 |
| $^{226}Ra$ | 1.000 | 0.000 | 0.006 | 0.016 | 0.000 | 0.008 | 0.005 | 0.034 | 0.000 |

**Cálculo del factor de calibración para una mezcla de radionucleidos**

Cuando ocurre una **contaminación superficial** con una mezcla de radionucleidos, es posible estimar la actividad superficial de la mezcla contaminante siempre que se conozcan las fracciones de actividad de cada componente.

El factor de calibración es posible calcularlo entonces mediante la expresión:

$$FC = \frac{1}{W \cdot \sum_n \eta_n \cdot \left( \sum_j \varepsilon_{i,j} \cdot \gamma_j \cdot \varepsilon_{s,j} \right)_n} \qquad (3.4)$$

Donde:

$\eta_n$ es la fracción del radionucleido n en la mezcla contaminante. Los símbolos restantes tienen el mismo significado que en la ecuación (3.3).

La suma exterior, en el denominador de la ecuación (4), ocurre a través de todos los radionucleidos presentes en la mezcla.
Una vez calculado el factor de calibración del instrumento, la actividad pudiera estimarse mediante la expresión (1) . La distancia entre la ventana del instrumento y la superficie a evaluar ha de ser igual a la distancia entre la ventana y la superficie de la fuente de referencia, adoptada durante la calibración del instrumento.

**Evaluación de incertidumbres**

La incertidumbre relativa combinada del factor de calibración obtenido mediante la ecuación (3.3), correspondiente a una desviación estándar, puede calcularse a partir de las incertidumbres relativas, correspondientes a una desviación estándar, de los parámetros de la ecuación, utilizando la siguiente expresión:

$$\frac{U(FC)}{FC} = \sqrt{\frac{U^2(W)}{W^2} + \frac{1}{\left(\sum_j \varepsilon_{i,j} \cdot \varepsilon_{S,j} \cdot \gamma_j\right)^2} \cdot \sum_j \varepsilon_{i,j}^2 \cdot \varepsilon_{S,j}^2 \cdot \gamma_j^2 \cdot \left(\frac{U^2(\varepsilon_{i,j})}{\varepsilon_{i,j}^2} + \frac{U^2(\varepsilon_{S,j})}{\varepsilon_{S,j}^2} + \frac{U^2(\gamma_j)}{\gamma_j^2}\right)} \qquad (3.5)$$

Donde: U(x) representa la incertidumbre de la variable x, correspondiente a una desviación estándar. El resto de los símbolos son idénticos a los utilizados en las ecuaciones (1), (2) y (3).

La incertidumbre relativa, correspondiente a una desviación estándar, en la estimación de la actividad superficial a partir de las expresiones (1), (2) y (3) puede estimarse mediante la fórmula:

$$\frac{U(A_S)}{A_S} = \sqrt{\frac{U^2(r) + U^2(r_B)}{(r - r_B)^2} + \frac{U^2(FC)}{FC^2}} \qquad (3.6)$$

Sustituyendo la expresión (5) en (6) se obtiene la fórmula general para el cálculo de la incertidumbre relativa combinada de la actividad superficial evaluada a partir de las incertidumbres, correspondientes a una desviación estándar, de cada una de las variables que intervienen en la estimación de la actividad superficial:

$$\frac{U(A_S)}{A_S} = \sqrt{\frac{U^2(r)+U^2(r_B)}{(r-r_B)^2} + \frac{U^2(W)}{W^2} + \frac{1}{\left(\sum_j \varepsilon_{ij}\cdot\varepsilon_{Sj}\cdot\gamma_j\right)^2}\cdot\sum_j \varepsilon_{ij}^2\cdot\varepsilon_{Sj}^2\cdot\gamma_j^2\cdot\left(\frac{U^2(\varepsilon_{ij})}{\varepsilon_{ij}^2}+\frac{U^2(\varepsilon_{Sj})}{\varepsilon_{Sj}^2}+\frac{U^2(\gamma_j)}{\gamma_j^2}\right)} \quad (3.7)$$

**Cuantificación de las incertidumbres correspondientes a una desviación estándar**

La incertidumbre asociada a los parámetros utilizados en los cálculos de los factores de calibración puede presentarse o estimarse de diversas formas. Las siguientes recomendaciones para la estimación de las incertidumbres han sido deducidas de las referencias [5,6].

Las incertidumbres U(r) y U($r_B$) podrán ser evaluadas de las siguientes formas, según sea conveniente y atendiendo a las características de los instrumentos de medición utilizados:

a) Anotando 10 valores indicados por el instrumento ($x_1$, $x_2$,…, $x_{10}$) a intervalos de tiempo fijos. El resultado de la medición se calcula como la media aritmética de estos valores, según: $\bar{x} = \frac{1}{10}\cdot\sum_{i=1}^{10} x_i$ y la desviación estándar según la expresión: $S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{90}}$. La incertidumbre U(x) para una desviación estándar es igual a la desviación estándar S(x).
b) Anotando el valor máximo ($x_{max}$) y el valor mínimo ($x_{min}$) de la indicación del instrumento durante el tiempo de medición seleccionado. El resultado de la

medición se calcula mediante la expresión: $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y la incertidumbre U(x), para una desviación estándar, puede estimarse adoptando una distribución uniforme: $U(x) = \frac{1}{\sqrt{12}} \cdot \left(x_{\max} - x_{\min}\right)$ ó $U(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$, para $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$, siendo a la mitad del rango de variación.

Cuando el valor de la incertidumbre ( I ) de la magnitud x se tome de un certificado de calibración, de una tabla de datos de referencia u hoja de especificaciones, en los que figure como un múltiplo de la desviación típica estimada, la incertidumbre de la magnitud x correspondiente a una desviación estándar, se calculará mediante la división por el factor de cobertura (k) pertinente: $U(x) = \frac{I}{k}$.

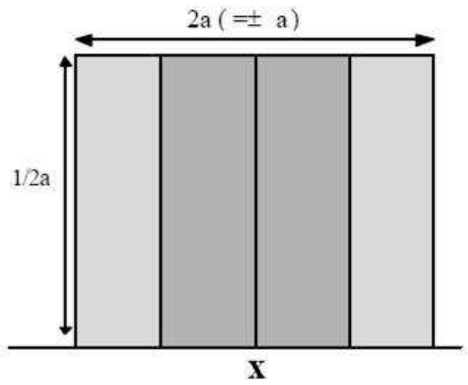
Cuando se indique la incertidumbre de la magnitud x en forma de intervalo de confianza, especificándose el nivel de confianza, tal como 95 ó 99% y no se especifique el tipo de distribución estadística de esta magnitud, se asumirá que tiene una distribución normal y la incertidumbre correspondiente a una desviación estándar se calculará dividiendo el intervalo de confianza por el factor de cobertura correspondiente. Por ejemplo, para los niveles indicados anteriormente los factores de cobertura serían 1.960 y 2.576 respectivamente.

Cuando la variable x tenga una distribución normal y se conozcan los valores $x_{max}$ y $x_{min}$ tales que el mejor estimado de $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y exista un 50% de probabilidad que la variable x esté en el intervalo ($x_{min}$, $x_{max}$), la incertidumbre correspondiente a una desviación estándar se calculará como: $U(x) = 1.48 \cdot a$, donde $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ es la mitad de la longitud del intervalo.

Cuando se realice una estimación mediante repetidas observaciones de un proceso de variación aleatoria, se indique una incertidumbre como una desviación típica *s* o $\sigma$, la incertidumbre de la variable correspondiente, para una desviación estándar, se obtendrá directamente como U = s.

Cuando la variable x tenga una distribución normal y se conozcan los valores $x_{max}$ y $x_{min}$ tales que el mejor estimado de $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y exista una probabilidad igual a 2/3 (67) que la variable x esté en el intervalo ($x_{min}$, $x_{max}$), la incertidumbre correspondiente a una desviación estándar se calculará como: $U(x) = a$, donde $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ es la mitad de la longitud del intervalo.

Cuando se conozca que la variable x tiene un 100% de probabilidad de estar en el intervalo entre los valores: $x_{min}$ y $x_{max}$, y no exista información sobre alguna distribución en particular, la variable x puede considerarse con distribución uniforme (Densidad de probabilidad según la Figura 1 ).



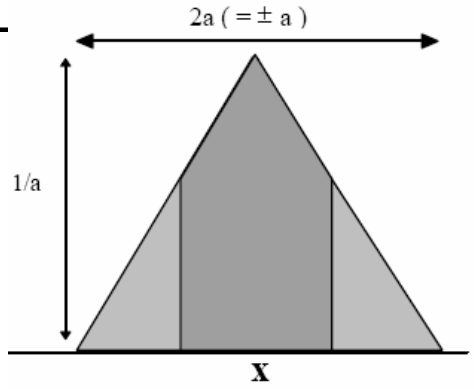

Mejor estimado de $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$

$U(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$, donde: $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$

Figura 1: Densidad de probabilidad de distribución uniforme

La distribución rectangular como la mostrada en el ejemplo anterior es un modelo predefinido razonable en ausencia de información más específica sobre la función de densidad de probabilidad de la variable x. Cuando sea realista pensar que los valores más probables se encuentran cerca del punto central del intervalo, puede sustituirse la distribución rectangular por una trapezoidal, triangular o normal y deducir la varianza apropiada.

Por ejemplo, para una distribución triangular (Figura 2) la incertidumbre de la variable x, correspondiente a una desviación estándar estaría dada por la expresión:




$$U(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \text{ , donde: } a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$$

El mejor estimado de $x = \dfrac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$

Cuando la variable x tenga una distribución normal y se conozcan los valores $x_{max}$ y $x_{min}$ tales que se considere que el intervalo ($x_{min}$, $x_{max}$) contiene la "casi totalidad" de los posibles valores de x, el mejor estimado se calculará como $x = \dfrac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y asumirá que el intervalo ($x_{min}$, $x_{max}$) contiene el 99.73% de los valores de x, lo que corresponde a 3 desviaciones estándar. La incertidumbre correspondiente a una desviación estándar se calculará entonces como: $U(x) = \dfrac{a}{3}$, donde $a = \dfrac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ es la mitad de la longitud del intervalo.

## VI. CONCLUSIONES.

1. Se realizó un ensayo piloto inicial donde verificó la magnitud del problema a resolver, el cual permitió corroborar que los monitores de **contaminación superficial** del país se usan sin estar calibrados o verificados por un laboratorio competente que certifique su estado metrológico.

2. Por primera vez en Cuba se desarrolló e implementó una metodología para la calibración de monitores de **contaminación superficial**. La metodología elaborada está en concordancia con las nomas existentes internacionalmente:
    - ISO/WD 7503-3: Evaluation of surface contamination – Part 1: Direct Metod.2006
    - ISO 7503-3: Evaluation of surface contamination – Part 1: Beta-emiters (maximum beta energy greater than 0.15 Mev).1996.
    - ISO 7503-3: Evaluation of surface contamination – Part 3: Isomeric transition and electron capture emitters, low energy beta-emitters (Emax 0.15 Mev).1996.
    - ISO 8769 Reference sources for the calibration of surface contamination monitors – Beta emitters (maximum beta energy less than 0.15 Mev) and alpha-emitters, 1988.
    - ISO 8769 Reference sources for the calibration of surface contamination monitors – Beta emitters (maximum beta energy less than 0.15 Mev and photons of energy less than 1.5 Mev), 1996.

3. Se implementó la metodología en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD) del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) a través de un servicio nacional para la calibración de monitores de **contaminación superficia**l. Se garantiza así el aseguramiento metrológico de las medidas de **contaminación superficial** en las prácticas con uso de fuentes no selladas en Cuba.

4. Se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos. El análisis estadístico corrobora la factibilidad de la aplicación de la metodología elaborada.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Elaborar una Norma Cubana para la verificación de monitores de **contaminación superficial**.
2. Determinar un factor de corrección para optimizar el método de las posiciones sucesivas.

## II. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


1. Adrian M.H. van der Veen, Jean Pauwels ISO/REMCO TG 5, Sampling N 27 Uncertainty calculations in the certification of reference materials. Principles of analysis of variante. May 2000.
2. Bauer,Tim. Calibration for Scaninning and Direct Measurement of Surface Activity. En: 14th Annual Meeting Council on Ionizing Radiation Measurents and Standards. Gathersburg, MD, Octubre 2005.
3. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML (1993) “Guide to the expression of uncertainty in measurement”, first edition, ISO Geneva, 1993
4. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML (1993) “Guide to the expression of uncertainty in measurement”, first edition, ISO Geneva, 1993
5. Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. Technical Report Series (on preparation).IAEA, Vienna, July 1996.
6. Colección Seguridad No. 115 “Normas básicas internacionales de seguridad para la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación”. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena, 1997.
7. Cooper, Sarenee. A Method for Establishing e-Trazability to NIST High-Dose
8. Measurement Standards, NIST, En: 14th Annual Meeting Council on Ionizing Radiation Measurents and Standards. Gathersburg, MD, Octubre 2005.
9. Colectivo de autores. Programa del curso superior de protección radiological. La Habana ,1998.
10. Colectivo de autores. Protección radiological en la aplicación de las teorías nucleares. La Habana, Ed. Cubaenergía, 2002.
11. Dan, Sisk y Johnson, Michelle. Empirically Derived Minimum Detectable Count Rates for Contaminations Surveys, PNNL. En: 14th Annual Meeting Council on Ionizing Radiation Measurents and Standards. Gathersburg, MD, Octubre 2005.
12. Delacroix, D., Guerre, J. P. and Leblanc, P. *Radionuclides and Radioprotection*. (French Atomic Energy Commission), (June 1994).

13. Eisele, Shawna y Olsher, Dick. Evaluation of Alpha and Beta Surface Contamination using Portable Contamination Using Portable Contamination Monitors, En: 14th Annual Meeting Council on Ionizing Radiation Measurents and Standards. Gathersburg, MD, Octubre 2005.

14. Guide to expresión of uncertaity in measurement. Switzerland, International Organization for Standardization, 1995.

15. Henson, P. W. Radiation Dose to the Skin in Contact with Unshielded Syringes Containing Radioactive Substances. Br. J.Radiol. 46, 972–977 (1973).

16. IAEA. International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115, (Vienna: IAEA) (1996).
17. IAEA. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 1996 Edition. Safety Standards Series No.ST1/Requirements (Vienna: IAEA) (1996).
18. ICRP. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. Publication 68 (Oxford: Pergamon) (1994).
19. ICRP. Data for Use in Radioprotection against External Radiation. Publication 51 (Oxford: Pergamon) (1987).
20. ICRP. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers, Replacement of ICRP Publication 54. Publication 78 (Oxford: Pergamon) (1997).
21. ICRP. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Publication 30 (Oxford: Pergamon) (1979–1988). (Parte 1–4 y el suplemento)
22. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60, (Oxford:
23. International Organization for Standardization “ISO Guide 35:1989 - Certification of reference materials - General and statistical principles”, second edition, ISO Geneva, 1989.
24. International Organization for Standardization, “ISO 5725-1:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General

principles and definition", Statistical methods for quality control Vol. 2 (1994), pág. 9-29

25. International Organization for Standardization, "ISO 5725-3:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method", Statistical methods for quality control, pág. 75-104
26. ISO internacional Vocabulary of Basic and general terms metrology. 1993.
27. ISO/REMCO TG 5, Sampling N 28 Uncertainty calculations in the certification of referente materials. 2. Homogeneity study, May 2000
28. ISO/WD 7503-3: Evaluation of surface contamination – Part 1: Direct Metod.2006
29. ISO/WD 7503-3: Evaluation of surface contamination – Part 2: Indirect Metod.2006
30. ISO 7503-3: Evaluation of surface contamination – Part 1: Beta-emiters (maximum beta energy greater than 0.15 Mev).1996.
31. ISO 7503-3: Evaluation of surface contamination – Part 3: Isomeric transition and electron capture emitters, low energy beta-emitters (Emax 0.15 Mev).1996.
32. ISO 8769 Reference sources for the calibration of surface contamination monitors – Beta emitters (maximum beta energy less than 0.15 Mev) and alpha-emitters, 1988.
33. ISO 8769 Reference sources for the calibration of surface contamination monitors – Beta emitters (maximum beta energy less than 0.15 Mev and photons of energy less than 1.5 Mev), 1996.
34. Kocher, D. C. and Eckerman, K. F. Electron Dose Rate Conversion Factors for External Exposure of the Skin from Uniformly Deposited Activity on the Body Surface. Health Phys. 53(2) 135–141 (1987).
35. Lagoutine, F., Coursol, N. and Legrand, J. Tables des Radionucle´ides. CEA-ORIS, 4 vol, (1983–1987).
36. Law A.M., Kelton W.D., "Simulation modeling and analysis", 2nd edition, McGraw Hill, New York 1991, chapter 6

37. Mattos O Ramos, Mantel Controle de qualidade das fontes de contaminação.2004.

38. Mike Unterweger NIST Activities in sources for Area Monitoring, En: 14th Annual Meeting Council on Ionizing Radiation Measurents and Standards. Gathersburg, MD, Octubre 2005.

39. Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers: Design and Interpretation. Publication 78 (Oxford: Pergamon) (1998).

40. Moreau, A. La Radioprotection dans les Laboratoires de Faible et Moyenne Radioactivite´. CEA-Saclay. Report SPR/SRI, 1981.

41. Murray R. Spiegel. Teoría y problema de estadística. La Habana, Instituto cubano del libro, 1975.

42. Pauwels J., Kurfürst U., Grobecker K.H., Quevauviller Ph., "Microhomogeneity study of BCR candidate reference material CRM-422 - cod muscle", Fresenius J. Anal. Chem. 345 (1993), pág. 478-481

43. Pauwels J., Lamberty A., Schimmel H. "Homogeneity testing of reference materials", Accreditation and Quality Assurance 3 (1998), pág. 51-55

44. Perotin, J. P. y Goubert, J. Evaluation des Risques d'Irradiation des Mains dans un Laboratoire de Controˆle Radiopharmaceutique.D. CEA-Saclay. Report SPR/SRI (1979).

45. RadDecay Version 1.13. Grove Enginering (Rockville, Maryland, USA) (1996).

46. Resolución Conjunta CITMA – MINSAP "Normas Básicas de Seguridad Radiológica" NBSR)

47. Safety Reports Series No. 16"Calibration of Radiation Protection MonitoringInstrumens". International Atomic Energy Agency Vienna, 2000.

48. Scott Clare, Burgess Peter, Woods Mike "The examination, Testing & Calibration of Portable Radiation Protection Instruments" en Masurement Good Practice Guide No.14. National Physical Laboratory, March 1999.

49. Schiller S.B., "Statistical aspects of the certification of chemical batch SRMs", NIST Special Publication 260-125, Gaithersburg, 1996

50. Schmidt, W., Nowotny, R., Kletter, P. and Frisschauf, H. Radiation Exposure due to 99mTc and 131I Manipulated in Syringes.J. Nucl. Med. 4, 389–391 (1979).
51. Schuler, Ch y Werli, C. Evaluation of surface contamination – Proporsal for revision of ISO standard 7503, En: 14th Annual Meeting Council on Ionizing Radiation Measurents and Standards. Gathersburg, MD, Octubre 2005.
52. Snedecor G.W., Cochran W.G., "Statistical methods", 8th edition, Iowa State University press, Iowa USA, 1989, chapter 13
53. Takaku, Y. and Kida, T. Radiation Dose to the Skin and Bone of Fingers from Handling Radioisotopes in a Syringe. Health Phys 22, 295–297 (1971).
54. Van Dalsem, Daniel. Planar Calibration Standards: Manufacture, Calibration and Trazability., En: 14th Annual Meeting Council on Ionizing Radiation Measurents and Standards. Gathersburg, MD, Octubre 2005.
55. Veen A.M.H. van der, Pauwels J., "Uncertainty calculations in the certification of referente materials. 1. Principles of analysis of variance".2004
56. Veen A.M.H. van der, Alink A., "A practitioner's approach to the assessment of the quality of sampling, sample preparation, and sub sampling", Accreditation and Quality Assurance 3 (1998), pág. 20-26
57. Vigilancia radiológica de los puestos de trabajo y evaluación de la contaminación superficial. La Habana, s.e, 2007.