



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física

**CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO BERTHOLD
LB 122 NO. 165397-6847 PARA MEDIR LA
CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL BETA EN EL
LABORATORIO SECUNDARIO DE CALIBRACIÓN
DOSIMÉTRICA DE GUATEMALA**

Diego Alexander Ibarra García

Asesorado por Lic. Edgar Andrés Monterroso Urrutía y
M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO BERTHOLD
LB 122 NO. 165397-6847 PARA MEDIR LA
CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL BETA EN EL
LABORATORIO SECUNDARIO DE CALIBRACIÓN
DOSIMÉTRICA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JEFATURA DEL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POR

DIEGO ALEXANDER IBARRA GARCÍA
ASESORADO POR LIC. EDGAR ANDRÉS MONTERROSO URRUTÍA Y
M.SC. JORGE MARCELO IXQUIAC CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



CONSEJO DIRECTIVO

DIRECTOR M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
SECRETARIO ACADÉMICO M.Sc. Edgar Anibal Cifuentes Anléu

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR M.Sc. Osmar Hernández
EXAMINADOR Lic. Héctor Pérez
EXAMINADOR M.Sc. Ricardo Contreras



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas



Ref. D.DTG. 009-2018
Guatemala 17 de septiembre de 2018

El Director de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Coordinador de la Licenciatura en Física Aplicada, al trabajo de graduación titulado: **CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO BERTHOLD LB 122 NO. 165397-6847 PARA MEDIR LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL BETA EN EL LABORATORIO SECUNDARIO DE CALIBRACIÓN DOSIMÉTRICA DE GUATEMALA** presentado por el estudiante universitario **Diego Alexander Ibarra García**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


MSc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Director



AGRADECIMIENTOS

A mis asesores Lic. Edgar Monterroso Urrutía y a MSc. Marcelo Ixquiac Cabrera por la asesoría en la elaboración de éste trabajo.

A Ing. Mayra Villatoro y a Lic. Claudia Quintero por permitir realizar éste trabajo en el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.

A Dr. Roberto Flores por su apoyo y consejos desde mis estudios en el colegio y actualmente en la universidad.

A los catedráticos de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la universidad por sus enseñanzas.

A Claudia y a Viky por su apoyo en la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas.

A mis amigos y compañeros de estudio por las vivencias compartidas durante la carrera universitaria.

A mis familiares por sus consejos.

DEDICATORIA

A Dios por darme salud para lograr mis objetivos y sueños en la vida.

A mis padres por su apoyo incondicional.

*“So this is where it ends, the road we took together
Turn another page, however and forever
We only got one chance, the seconds are fading
Under the moonlight, we’re wishing the same thing
I wanna remember, remember this moment
Remember this moment, remember this moment”
We Came As Romans - Memories*

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
OBJETIVOS	IX
INTRODUCCIÓN	XI
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	1
1.1. Contaminación Superficial	1
1.2. Radiación Ionizante	1
1.3. Radiactividad y Periodo de Semidesintegración	3
1.4. Decaimiento Beta	4
1.4.1. Velocidad y Energía de las Partículas Beta	4
1.4.2. Niveles de Energía y Esquemas de Decaimiento	5
1.4.3. El Neutrino	5
1.5. Detectores de Radiación para Contaminación Superficial	6
1.5.1. Contadores Proporcionales	6
1.5.1.1. Regiones de operación del detector	8
1.5.2. Contador Geiger-Muller	8
1.5.3. Centellador o Detector de Centelleo	9
1.6. Eficiencia de Detección	10
2. EQUIPO Y MÉTODO PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL	11
2.1. Equipo	11
2.1.1. Monitor de Contaminación LB 122 No. 165397-6847	11
2.1.1.1. Descripción del LB 122	12

2.1.2. Fuentes de Radiación	13
2.1.3. Posicionador de Fuentes Planas	15
2.2. Método para Evaluar la Contaminación Superficial	16
3. MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	17
3.1. Adquisición de Datos Crudos	18
3.2. Análisis de Datos	19
3.2.1. Cálculo de Incertidumbre	21
3.2.2. Ajuste para la relación entre el Factor de Calibración y Eficiencia	22
4. RESULTADOS	23
4.1. Factores de Calibración para cada Fuente Plana	23
4.2. Eficiencia del Instrumento de Detección	24
4.3. Relación entre el Factor de Calibración y la Eficiencia	25
4.4. Discusión de Resultados	27
CONCLUSIONES	29
RECOMENDACIONES	31
ANEXOS	33
A. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA	33
A.1. Protección Radiológica	33
A.1.1. Clasificación del Personal Expuesto y Límites de Dosis	34
A.2. Efectos Biológicos de la Radiación ionizante	35
A.3. Seguridad en la Manipulación de Fuentes Radiactivas	36
A.4. Protección Radiológica para Contaminación Superficial	37
B. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES	39
B.1. Media Aritmética y Distribución Estándar Muestral	39
B.2. Incertidumbre Combinada Estándar e Incertidumbre Expandida	40
B.3. Cálculo de la Incertidumbre	41
C. DATOS DE MEDICIÓN DE FONDO Y DE FUENTES PLANAS	42
D. DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DEL Sr-90/Y-90	48
D.1. Nucleido Hija con Vida Muy Corta que el Padre	48
D.2. Cálculo de la Actividad del Sr-90/Sr-90	48
E. DESCLASIFICACIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS	50
BIBLIOGRAFÍA	53

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Espectro de la partícula- β^- de Bismuto-210.	5
1.2.	Esquemas de decaimiento para emisores β	6
1.3.	Las diferentes regiones de operación para los detectores de gas.	7
1.4.	Descripción de un tubo Geiger.	8
1.5.	Descripción de un detector de centelleo con un material centelleador y compuesto de un tubo fotomultiplicador.	9
2.1.	Monitor de contaminación superficial LB122 No. 165397-6847.	11
2.2.	Ensamblaje del tubo de conteo LB 6358 G.	12
2.3.	Fuentes planas con dimensión superficial de 100 mm \times 100 mm.	13
2.4.	Esquemas de decaimiento de las fuentes utilizadas para la calibración.	14
2.5.	Posicionador de fuentes de radiación.	15
2.6.	Diagrama del posicionador de fuentes de radiación.	15
3.1.	Vista frontal de la distribución del equipo en el proceso de medición de radiación de una fuente de radiación plana.	18
3.2.	Vista superior de la colocación de la fuente de radiación en el posicionador de fuentes planas centrado en la coordenada (3,B).	19
4.1.	Comportamiento entre la energía máxima beta y el factor de calibración de las cinco fuentes planas.	24
4.2.	Comportamiento entre la energía máxima beta y la eficiencia de las cinco fuentes planas.	25
4.3.	Relación y ajuste, utilizando la ecuación 4.1, entre el factor de calibración y la eficiencia del instrumento. Los datos del factor de calibración y de la eficiencia absoluta se encuentran en la <i>Tabla 4.1</i> y <i>Tabla 4.2</i> , respectivamente.	26
A.1.	Esquema y descripción del principio ALARA.	36
A.2.	Símbolo recomendado por la IAEA en presencia de radiación ionizante.	37
A.3.	Tipos de radiación y penetración.	38

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Fuentes de emisión beta utilizadas para la calibración.	13
3.1. Fuentes de emisión beta con su valor de actividad y conteos por segundo. .	17
3.2. Valores de actividad inicial, actividad a la fecha de 18-07-18 y actividad superficial de las cinco fuentes planas.	20
4.1. Factor de Calibración de los diferentes radionucleidos.	23
4.2. Valores de las eficiencias.	24
4.3. Resultados del ajuste.	25
A.1. Límites de dosis recomendadas en situaciones de exposición planeadas. . .	35
B.2. Cálculo de la incertidumbre de la calibración.	41
C.1. Datos de medición de fondo.	42
C.2. Datos obtenidos para la fuente de C-14.	43
C.3. Datos obtenidos para la fuente de Co-60.	44
C.4. Datos obtenidos para la fuente de Cs-137.	45
C.5. Datos obtenidos para la fuente de Cl-36.	46
C.6. Datos obtenidos para la fuente de Sr-90.	47
E.1. Tabla No.2 - Niveles de Desclasificación para desechos líquidos.	50
E.2. Radioisótopos más comunes de medicina nuclear.	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Actividad
A_0	Actividad inicial
cps	Conteos por segundo
c	Velocidad de la luz
D_t	Número de cps teórico
e	Carga eléctrica
ϵ_{abs}	Eficiencia absoluta
FC	Factor de calibración
f	Frecuencia del fotón
H	Campo magnético
Hr	Rigidez magnética
h	Constante de Planck
λ	Constante de decaimiento
M	Medición del monitor
M_b	Medición de fondo
m	Masa
m_0	Masa en reposo
N	Número de partículas
N_0	Número inicial de partículas
n	Neutrón
ν	Neutrino
$\bar{\nu}$	Antineutrino
p	Protón
rayo- β	Rayo beta
rayo- δ	Rayo delta
rayo- γ	Rayo gamma
S_A	emisión superficial

Símbolo	Significado
$s(x_i)$	Distribución estándar muestral
T	Energía cinética
t	Tiempo
$u_c(y)$	Incertidumbre estándar muestral
U	Incertidumbre expandida
$\tau_{1/2}$	Periodo de semidesintegración
v	Velocidad
\bar{x}	Promedio
Z	Número atómico

OBJETIVOS

General

Desarrollar el procedimiento de calibración de contaminación superficial y realizar la calibración para el instrumento LB 122 No. 165397-6847 para contaminación beta.

Específicos

1. Establecer el procedimiento de calibración para contaminación beta.
2. Asegurar que el instrumento de monitoreo de contaminación superficial cumpla con capacidad metrológica.

INTRODUCCIÓN

La contaminación radioactiva es la presencia de materiales radiactivos en lugares no deseados, en particular, donde puede ser dañino a seres vivos, objetos materiales o al medio ambiente.

La contaminación radiactiva superficial es la presencia de sustancias radiactivas en una superficie y se expresa en unidades de actividad por unidad de área, en el Sistema Internacional es becquerels por metro cuadrado (Bq/m^2). Los dos tipos de contaminación superficial son: contaminación fija y contaminación removible, ambas con diferente metodología para evaluar la contaminación. Los instrumentos más comunes utilizados para medir la contaminación superficial son: los centelladores, contadores proporcionales y el detector Geiger-Muller.

El monitoreo de la contaminación superficial es un proceso importante para la protección radiológica, pues es necesario detectar la contaminación radiactiva y su extensión, con el objetivo de verificar que los límites permitidos de radiación no sean excedidos. Por lo tanto, los instrumentos deben ser debidamente calibrados y probados en el laboratorio.

El equipo para monitoreo de radiación ionizante, es utilizado para asegurarnos un ambiente con seguridad radiológica. El propósito de este equipo, es el monitoreo de concentraciones de sustancias radiactivas para proteger a personas expuestas a ésta, como pacientes por diagnósticos médicos en el área de medicina nuclear, trabajadores operacionalmente expuestos o publico general. Por lo tanto, la importancia de la calibración al instrumento de detección de contaminación superficial es requisito esencial, para proveer confianza en las mediciones realizadas con los medidores de actividad (activímetros) en la aplicación del tratamiento en el área de medicina nuclear y cumplir con las normas que establece la ley para la protección radiológica.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1. Contaminación Superficial

La contaminación superficial es definida como la presencia no deseada de sustancias radiactivas en una superficie. La contaminación superficial se divide en dos tipos, fija o removible. La contaminación superficial fija es la contaminación adherida a una superficie, de tal manera que no es transferible en condiciones normales de trabajo. La contaminación superficial removible es la contaminación superficial que es trasladable bajo condiciones normales de trabajo. La actividad de una sustancia radiactiva se determina por el valor del número de desintegraciones que sufre por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional la contaminación superficial se expresa en becquerels por metro cuadrado (Bq/m^2) [8].

La contaminación superficial se puede determinar mediante dos métodos, directo e indirecto. El método directo, realiza la medición de la actividad de la superficie por medio de un medidor o monitor de contaminación. El método indirecto, evalúa la actividad removible en la superficie por medio de una muestra.

La manipulación de fuentes radiactivas abiertas, implica un cierto riesgo de contaminación superficial, por ejemplo: mobiliario, instrumentos, herramientas y el cuerpo de una persona. Los instrumentos utilizados para la medición de contaminación superficial son: los contadores proporcionales, los contadores Geiger-Muller y los centelladores. Los resultados de las medidas se expresan en términos de tasa de recuento (conteos por segundo, cps) o actividad por área (Bq/cm^2).

1.2. Radiación Ionizante

Las *radiaciones ionizantes* son aquellas radiaciones con habilidad para excitar e ionizar átomos de la materia, extrayendo los electrones de sus estados ligados al átomo. La energía necesaria para que un electrón de valencia escape del átomo es

del orden de 4-25 eV, las radiaciones deben transportar energías superiores a esta magnitud para llamarlas “ionizantes” [1].

Los tipos importantes de radiación ionizante a considerar son:

1. *Rayos- γ* : Radiación electromagnética emitida de un núcleo o en reacciones de aniquilación entre materia y anti-materia. La energía de un fotón está dado en keV por

$$E_{\gamma} = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.2398 [keV \text{ nm}]}{\lambda [nm]}$$

2. *Rayos-X*: Radiación electromagnética emitida por partículas cargadas en el cambio de los niveles de energía atómica o ralentizando en un campo de fuerza de Coulomb (rayos-X continuo o bremsstrahlung). Comúnmente, el rango de rayos-X están definidas en términos de voltaje, de la siguiente manera:

0.1 – 20kV	Energía baja
20 – 120kV	Rango de diagnóstico
120 – 300kV	Ortovoltaje
300kV – 1MV	Energía intermedia
1MV en adelante	Megavoltaje

3. *Electrones Rápidos*: Si la carga es positiva, éstos son llamados positrones. Si son emitidos de un núcleo usualmente son referidos como partículas- β , pueden ser un electrón (β^{-}) o un positrón (β^{+}). Si resultan de una colisión de partícula cargada, éstos son referidos como rayos- δ . Un rayo continuo intenso de electrones hasta 12 MeV, son producidos por generadores Van de Graaff y rayos de electrones pulsados de mayor energía, son producidos en aceleradores lineales o microtrones.
4. *Partículas Pesadas Cargadas*: usualmente obtenidos de ciclotrón o de un acelerador lineal de partículas pesadas. Partículas alfa también son emitidas por algunos núcleos radiactivos. Los tipos son: protones, deuterones, tritón, partículas alfa o piones.
5. *Neutrón*: Partículas neutrales obtenidas de reacciones nucleares p. ej. fisión.

1.3. Radiactividad y Periodo de Semidesintegración

Si se consideran un número grande N de átomos radiactivos idénticos, definimos λ como la constante de decaimiento radiactivo total, que es usualmente expresado en segundos inverso (s^{-1}). El valor esperado del número total de átomos en un grupo que se desintegra por unidad de tiempo muy corto en comparación a $1/\lambda$ es llamado *actividad* del grupo, λN [1].

La actividad de una fuente radioisotópica está definida como la razón de decaimiento y está dada por la ley fundamental de decaimiento radiactivo

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1.1)$$

integrando la ecuación obtenemos el resultado:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

Podemos escribir la razón de las actividades en el tiempo t como

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\lambda N}{\lambda N_0} = e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

La unidad de actividad en el sistema internacional es el becquerel (Bq), definido como la actividad de una cantidad de material radiactivo con decaimiento de un núcleo por segundo. La unidad antigua es el Curie (Ci) definido como 3.7×10^{10} desintegraciones/segundo, siendo la conversión $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

Una característica importante asociada al decaimiento exponencial es el *periodo de semidesintegración* $\tau_{1/2}$, definido como el valor esperado del tiempo requerido para que una mitad del número inicial de núcleos se desintegre, por lo tanto, la actividad decrecerá la mitad

$$\frac{\lambda N}{\lambda N_0} = 0.5 = e^{-\lambda \tau_{1/2}}$$

$$\ln(0.5) = -0.6931 = -\lambda \tau_{1/2}$$

$$\tau_{1/2} = \frac{0.6931}{\lambda} \quad (1.4)$$

1.4. Decaimiento Beta

El decaimiento beta es un proceso donde un núcleido emite una partícula beta (partícula- β) compensando la relación de neutrones y protones del núcleo atómico.

1.4.1. Velocidad y Energía de las Partículas Beta

La velocidad de las partículas- β puede ser medida por medio de la deflexión del camino de las partículas en un campo magnético. Un instrumento de alta precisión puede medir la velocidad de las partículas- β emitidas por una fuente radiactiva y cuando se conoce la velocidad, la energía puede ser calculada.

Las partículas- β emitidas por nucleidos radiactivos naturales, pueden tener velocidades hasta de 0.99 de la velocidad de la luz. En general, debido que la energía de una partícula- β , sea positiva o negativa, son pequeñas, tienen energías menores a 4 MeV. La velocidad debe ser tratado relativísticamente debido a su alta velocidad [10]. Las fórmulas para la velocidad y la energía cinética son

$$v = Hr \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1.5)$$

$$T = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right] \quad (1.6)$$

donde H es el campo magnético, r es el radio de la órbita, m_0 es la masa en reposo del electrón, e es la magnitud de la carga eléctrica y c es la velocidad de la luz. Diferentes valores de la rigidez magnética (Hr) y la energía cinética (T) de las partículas- β en función de la velocidad, se pueden observar en el libro Nuclear Physics 2nd ed. [10, Tabla 14-1].

Cada transición de decaimiento beta, está caracterizado por una energía de decaimiento fija. Dado que la energía de lanzamiento del núcleo es virtualmente cero, la energía es compartida entre la partícula- β y el neutrino (ν). La partícula beta, por lo tanto, aparece con una energía que varía conforme al decaimiento. El espectro continuo de la energía de la partícula- β^- para el Bismuto-210 (^{210}Bi) se ilustra en la *Figura 1.1*.

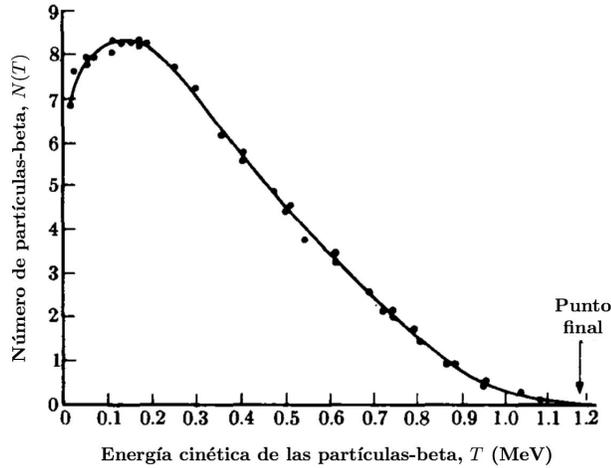


Figura 1.1. Espectro de la partícula- β^- de RaE (Bismuto-210). Ref: [10, p.314].

El espectro del Bismuto-210, muestra los aspectos importantes de un espectro continuo. Cada espectro β continuo, tiene un máximo definido, la altura y la posición dependen del núcleo que emite las partículas. También hay un límite superior de energía para las partículas emitidas por el nucleido. Éste límite superior o punto final del espectro continuo, es diferente para cada nucleido. Estas propiedades del espectro continuo son observados en emisores β naturales y artificiales.

1.4.2. Niveles de Energía y Esquemas de Decaimiento

Las transformaciones beta proporcionan información sobre los niveles de energía del nucleido producto y sobre los esquemas de decaimiento. Estas transformaciones, algunas veces están acompañadas de rayos gamma (rayos- γ). La presencia de la radiación γ , significa que el nucleido producto es formado en un estado excitado y pasa a su estado fundamental emitiendo uno o más rayos- γ . Si no hay emisión de rayo- γ , la transición β es directamente al estado fundamental del nucleido producto. En la *Figura 1.2* se muestran dos esquemas de decaimiento para emisores β .

1.4.3. El Neutrino

En la teoría de Fermi sobre el decaimiento β , las propiedades de las transformaciones β demuestran evidencia indirecta de la existencia de neutrinos. La propiedades que el neutrino debe cumplir con la teoría, es tener carga nula y una masa muy pequeña, esto implica que la interacción entre neutrinos y la materia, es extremadamente pequeña. En estudios de acuerdo a la mecánica cuántica relativista, los neutrinos en decaimientos β^- son diferentes comparados con los decaimientos β^+ .

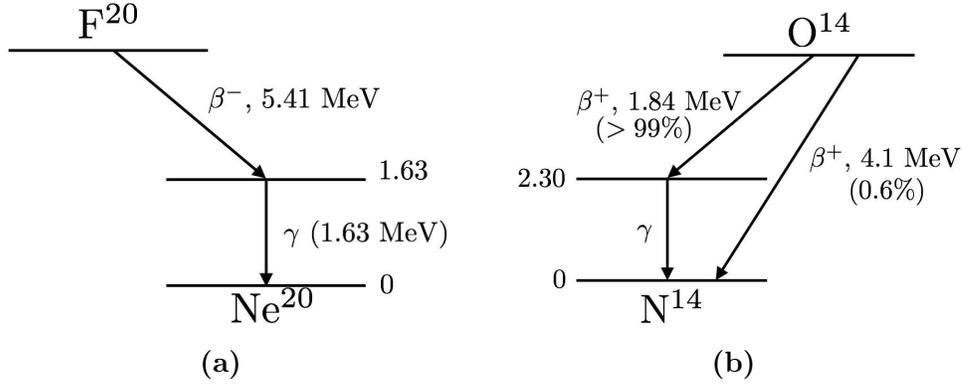


Figura 1.2. Esquemas de decaimiento para emisores β . (a) F^{20} . (b) O^{14} . Ref: [10, p.372].

El *neutrino* (ν) es definido como la partícula con vector espín, paralelo al vector momentum; y el *antineutrino* ($\bar{\nu}$), es una partícula con espín en dirección opuesta a su vector momentum. Por lo tanto, las ecuaciones para el proceso de emisión β son de la siguiente manera

$$\text{emisión } \beta^- : n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad (1.7)$$

$$\text{emisión } \beta^+ : p \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad (1.8)$$

La fuente más común de partículas beta es un radioisótopo que decae por emisión beta menos. El proceso esquemático es

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + \beta^- + \bar{\nu} \quad (1.9)$$

donde X y Y son la especie nuclear inicial y final, respectivamente; y $\bar{\nu}$ es un antineutrino. Dado que los neutrinos y antineutrinos tiene una pequeña probabilidad de interacción con la materia, éstos son indetectables para propósitos prácticos.

1.5. Detectores de Radiación para Contaminación Superficial

1.5.1. Contadores Proporcionales

El contador proporcional es un tipo de detector de gas. Los tubos proporcionales casi siempre son operados en modo pulso y utilizan el fenómeno de *multiplicación de gas* para amplificar la carga, representado por el par de iones original creados dentro del gas. El contador proporcional mide en términos de los números y ampli-

tudes de los pulsos individuales, en consecuencia, los contadores proporcionales se pueden aplicar cuando el número de pares de iones generados por la radiación es muy pequeña [11].

La multiplicación de gas es una consecuencia del incremento de campo eléctrico a un valor suficientemente alto. A valores pequeños de campo, los electrones e iones creados por la radiación incidente, deriva a su respectivos colectores. Durante la migración de las cargas, ocurren varias colisiones con las moléculas de gas natural. Los iones positivos o negativos tienen una movilidad lenta y por lo tanto, logran muy poca energía promedio entre las colisiones. Los electrones libres, fácilmente son acelerados por el campo aplicado y pueden tener mayor energía cinética en estas colisiones. La energía promedio del electrón incrementa cuando se incrementa el campo eléctrico y existe un valor límite del campo por encima del cual se producirá esta ionización secundaria. En gases típicos éste límite es del orden de 10^6 V/m.

El electrón liberado por esta ionización secundaria también es acelerada por el campo eléctrico. Durante la deriva, se somete a una colisión con otra molécula gas natural y de esta forma, se crea una ionización adicional. El proceso de multiplicación de gas, entonces, toma la forma de una cascada, conocida como *descarga de Townsend*, donde los electrones libres, creados por una colisión, pueden crear más electrones libres por el mismo proceso [11].

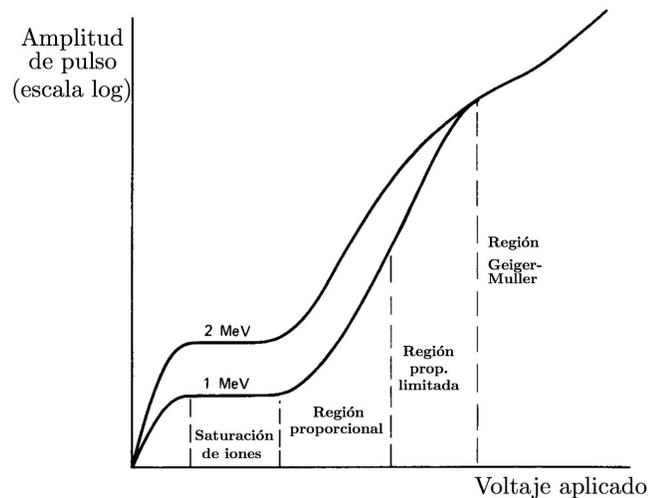


Figura 1.3. Las diferentes regiones de operación para los detectores de gas. Ref: [11, p.161].

1.5.1.1. Regiones de operación del detector

Existen varias diferencias entre los diversos tipos de contadores de gas operando en modo pulso, según se observa en la *Figura 1.3*. La gráfica está en términos de la amplitud de pulso del detector versus el voltaje o campo eléctrico aplicado dentro del detector. A valores bajos de voltaje, el campo es insuficiente para prevenir recombinación de los pares de iones originales y la carga colectada es menor que la representada por los pares de iones originales. Al incrementar el voltaje, la recombinación es contenida y se logra una región de saturación. Mientras se sigue incrementando el voltaje, el límite del campo en que la multiplicación de gas empieza es alcanzado. La carga se empieza a multiplicar y la amplitud de pulsos empiezan a incrementar. En un punto, la multiplicación de gas será lineal y la carga colectada será proporcional al número de pares de iones originales, creados por la radiación incidente. En éste punto, se logra la verdadera proporcionalidad y representa, el modo de operación de los contadores proporcionales convencionales [11].

Si se incrementa el voltaje, cada pulso del detector es de la misma amplitud y no reflejará alguna propiedad de la radiación incidente. Está región de operación, es para el detector Geiger-Muller.

1.5.2. Contador Geiger-Muller

El contador Geiger-Muller es un detector que también emplea la multiplicación de gas, para incrementar la carga representada por los pares de iones originales, formados a lo largo de la pista de radiación. El tubo se compone de una cámara de gas, que contiene dos electrodos. Las paredes del tubo forman un cátodo, y el ánodo es un hilo en el centro de la cámara.

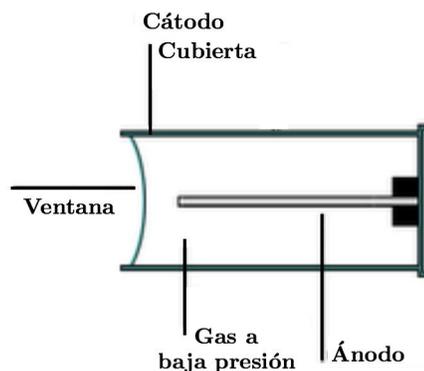


Figura 1.4. Descripción de un tubo Geiger.

Al detectar radiación, las moléculas de gas se ionizan en las paredes del tubo; esto crea pares de iones en el gas. En el tubo se crea un fuerte campo eléctrico que acelera los iones positivos al cátodo y los electrones al ánodo y por lo tanto, aumentan la intensidad en cada descarga. A un valor crítico de campo eléctrico, cada descarga puede crear más descargas que resultan en una reacción en cadena de auto-propagación. Un incremento exponencial de descargas, pueden ser creados en poco tiempo. Una vez está descarga llega a cierto tamaño, los efectos de colección de todas las descargas terminan la reacción en cadena. Debido a que este punto limite siempre se alcanza después de que se haya creado aproximadamente el mismo número de descargas, todos los pulsos del tubo Geiger son de la misma amplitud sin importar el número de pares de iones originales que iniciaron el proceso [11].

1.5.3. Centellador o Detector de Centelleo

El detector de centelleo, es un instrumento que detecta y mide la radiación ionizante por medio de la excitación en un centelleador debido a la radiación incidente. Un centelleador es un material que exhibe luminiscencia cuando es expuesto a radiación ionizante. El material absorbe energía de la partícula incidente y la remite en forma de destello de luz.

El detector de centelleo, está compuesto con un sensor de luz como lo ejemplifica un tubo fotomultiplicador (PMT, Photomultiplier tube) o un fotodiodo, que detecta la luz emitida por un material centelleador. El fotomultiplicador captura la luz que emite el centelleador y la remite como electrones debido al efecto fotoeléctrico y este proceso resulta en una multiplicación de electrones en cascada, produciendo una corriente eléctrica.

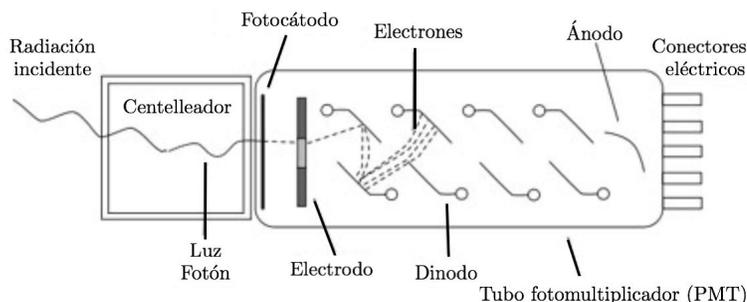


Figura 1.5. Descripción de un detector de centelleo con un material centelleador y compuesto de un tubo fotomultiplicador.

1.6. Eficiencia de Detección

Todos los detectores de radiación, dan lugar a un pulso por cada cantidad de radiación que interactúa dentro del volumen. Para partículas alfas o beta, la interacción en forma de radiación, tomará lugar inmediatamente al entrar al volumen activo del instrumento. Después de viajar una pequeña fracción, la partícula formará pares de iones en su camino para asegurar que el pulso sea lo suficientemente grande para ser captado. Por lo tanto, el detector captará todas las partículas alfa y beta que entre en su volumen activo. En estas condiciones, el detector tiene una eficiencia de detección de 100 % [11].

La eficiencia absoluta es dependiente de las propiedades del detector, pero también de los detalles de la geometría de detección, principalmente, la distancia de separación entre la fuente y el detector. La eficiencia absoluta se define de la siguiente manera

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{número de pulsos registrados}}{\text{número de partículas emitida por la fuente}} \quad (1.10)$$

2. EQUIPO Y MÉTODO PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

2.1. Equipo

En este capítulo, se presentan y describen los equipos más relevantes utilizados para la realización de la calibración.

2.1.1. Monitor de Contaminación LB 122 No. 165397-6847

El monitor de contaminación portable LB 122, es un instrumento diseñado para la detección y medición de fuentes alfa, beta y gamma en superficies como: paredes, mesas, objetos, ropa o piel. Está compuesto de una unidad de despliegue con un micro-procesador electrónico y un tubo de contador proporcional insertado en la parte de abajo del instrumento, con una ventana de área efectiva de 160 cm^2 . Los resultados pueden ser mostrados en tasa de conteos ($\text{cps} = \text{conteos por segundo}$) o actividad de área (Bq/cm^2) [2].

La conversión está basada en los factores de calibración que fueron determinados para cada nucleido y estos factores dependen del tipo de radiación, la energía y el patrón de decaimiento de nucleido respectivo. Otros factores relevantes son la sensibilidad del detector, la geometría de medición y la auto-absorción en la fuente



(a) Unidad de despliegue.



(b) Ventana de detección.

Figura 2.1. Monitor de contaminación superficial LB122 No. 165397-6847.

de calibración. El factor de calibración indica el valor por el cual los conteos por segundo tienen que multiplicarse para obtener el resultado desplegado en Bq/cm^2 .

2.1.1.1. Descripción del LB 122

El monitor de contaminación contiene tubos de contadores proporcionales para medir la radiactividad. El funcionamiento de estos tubos de conteo, se basan en el principio de multiplicación de carga en las inmediaciones de un cable de conteo delgado, al que se le aplica un alto voltaje positivo y es rodeado por un contador de gas especial (gas P-10, Butano, Xenón).

Las partículas alfa y beta que ingresan al tubo contador, ionizan los átomos del gas en su trayectoria, creando así portadores de carga (iones y electrones). Los electrones que se liberan en este proceso se mueven con alta velocidad hacia el ánodo del cable y mientras más se acercan, ganan más energía, hasta que nuevos pares de iones son creados y el número de estos pares de iones incrementa en la proximidad de estos cables de conteos. Mediante este proceso de multiplicación la carga entra en un rango medible. La carga creada, es decir, los pulsos eléctricos creados en el cable de conteo, son proporcionales al número de carga primaria (ionización primaria). Por lo tanto, pueden distinguirse las partículas alfa o beta. El alto voltaje aplicado a la multiplicación de carga, difiere para la medición de fuentes alfa, beta o gamma y es, empíricamente, determinado por cada detector.

El tubo de conteo LB 6358 G Alfa y Beta, está compuesto por el detector, la cámara de conteo con los cables de conteo y la ventana de tubo por debajo, como se observa en la *Figura 2.2*. La cámara de recuento está sellada con una delgada lámina para evitar que se escape el gas. Esta lámina especial, hecha de plástico cubierto con una superficie metalizada, es extremadamente delgada ($0.3 \text{ mg}/\text{cm}^2$) para garantizar una alta eficiencia del detector, incluso para la radiación alfa.

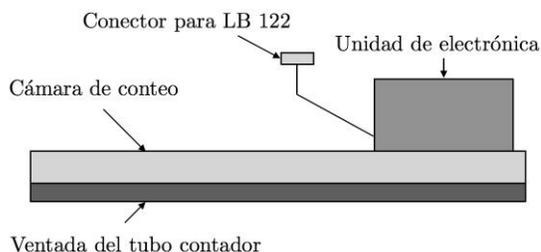


Figura 2.2. Ensamblaje del tubo de conteo LB 6358 G.

2.1.2. Fuentes de Radiación

Para la calibración del instrumento LB 122, se utilizaron cinco fuentes de radiación que emiten partículas beta. Las fuentes se muestran en la *Tabla 2.1* junto con su valor de energía máxima, la probabilidad de ocurrencia y su periodo de semidesintegración.

Tabla 2.1. Fuentes de emisión beta utilizadas para la calibración. Datos obtenidos del Nuclear Data Services de la IAEA (<https://www-nds.iaea.org>).

<i>Radionucleido</i>	<i>Energía máxima beta [keV]</i>	<i>Probabilidad</i>	$\tau_{1/2}$
^{14}C	156.475	100 %	$5,700 \pm 30$ años
^{60}Co	317.88	99.88 %	5.27 ± 0.04 años
^{137}Cs	514.03	94.7 %	30.08 ± 0.09 años
^{90}Sr	546.0	100 %	28.79 ± 0.06 años
^{36}Cl	709.55	100 %	$301,300 \pm 15$ años

Los diagramas de decaimiento para las cinco fuentes, se pueden observar en la Figura 2.4. Como caso especial, el radionucleido Estroncio-90, es un emisor beta con una energía de 546 keV, este decae al elemento Itrio-90 que tiene un periodo de semidesintegración de 64 horas. El Itrio-90 también decae en emisión beta por dos formas diferentes, 99.9 % de probabilidad emite betas con energía de 2,280.1 keV y 0.01 % de probabilidad con energía de 519.4 keV decayendo al estado fundamental Circonio-90.

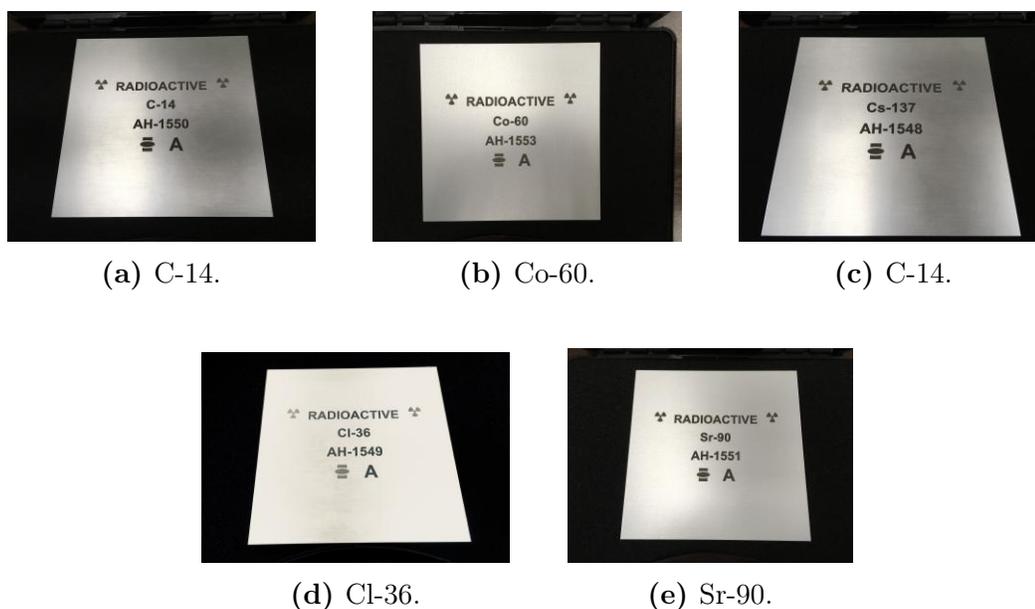
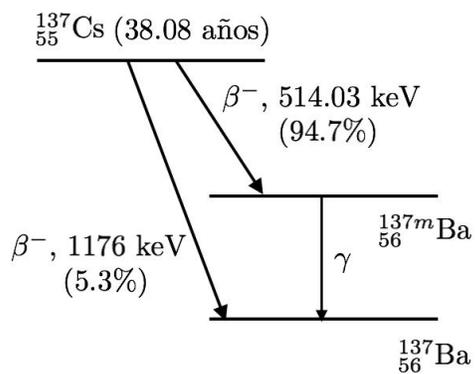
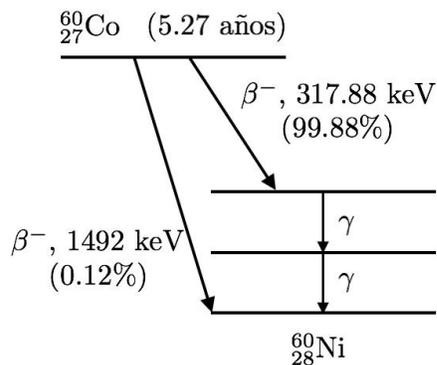


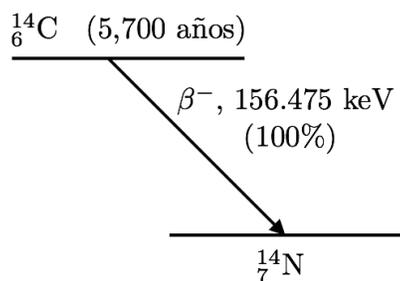
Figura 2.3. Fuentes planas con dimensión superficial de 100 mm \times 100 mm.



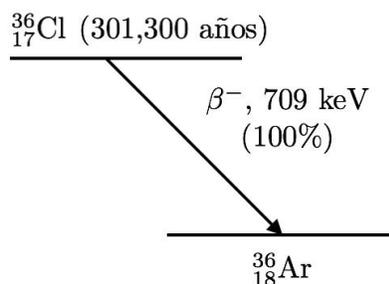
(a) Esquema del Cs-137.



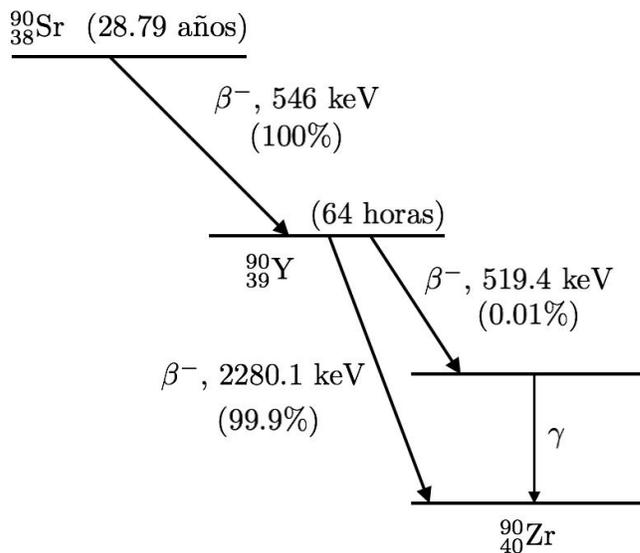
(b) Esquema del Co-60.



(c) Esquema del C-14.



(d) Esquema del Cl-36.



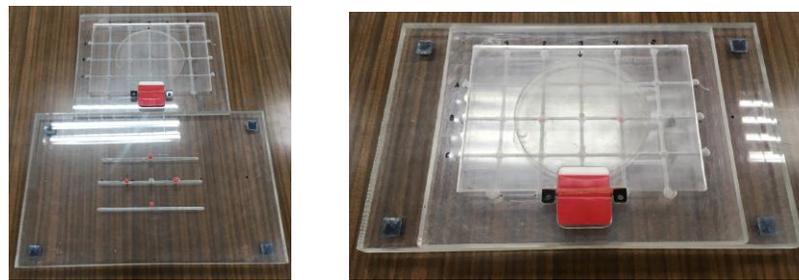
(e) Esquema del Sr-90.

Figura 2.4. Esquemas de decaimiento de las fuentes utilizadas para la calibración.

2.1.3. Posicionador de Fuentes Planas

El posicionador de fuentes planas sirve para posicionar una fuente plana rectangular, cuadrada o circular en diversas coordenadas para realizar las mediciones respectivas con el detector de radiación. El posicionador fue creado por Juan Fernando Tobar Castro y está hecho del material PMMA (Polimetilmetacrilato, comúnmente llamado acrílico).

Durante el proceso de calibración se pueden dar tres casos: i) la fuente emite partículas que inciden en toda la ventana del detector, ii) la fuente es más pequeña que la ventana del detector y iii) la fuente es más grande que la ventana del detector. Para la calibración de este equipo se da el caso ii), las cinco fuentes planas son más pequeñas que la ventana de detección del instrumento LB 122. En este caso, para que las partículas incidan en toda la ventana del detector, se coloca la fuente plana en el posicionador de fuentes y esta se debe desplazar en tres coordenadas diferentes.



(a) Individual.

(b) Conjunto.

Figura 2.5. Posicionador de fuentes de radiación.

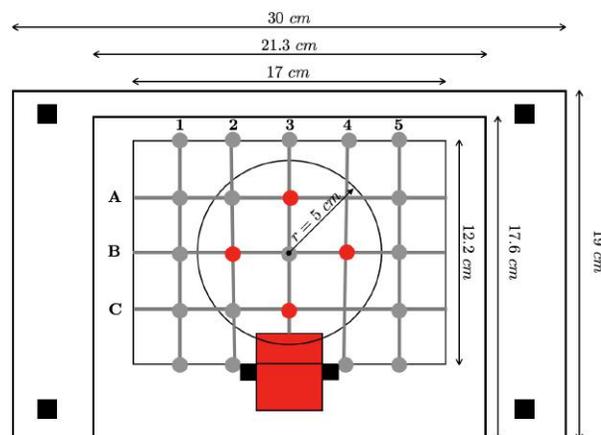


Figura 2.6. Diagrama del posicionador de fuentes de radiación.

2.2. Método para Evaluar la Contaminación Superficial

La contaminación superficial se puede evaluar por métodos de medición directa e indirecta. La medición directa, se lleva a cabo con contadores de contaminación superficial y monitores que responden a la contaminación removible y fija. La evaluación indirecta, es generalmente llevada a cabo por medio de pruebas de frotis y solamente la contaminación superficial removible puede ser evaluada [8].

Para este trabajo se utiliza el método de medición directa y su ejecución se describe a continuación:

Evitando contacto entre la ventana sensible del detector y la superficie que será revisada, el detector se desplaza lentamente sobre la superficie. Una vez se detecta el área de contaminación, el detector debe ser posicionado sobre el área y se sujeta estacionariamente por un tiempo suficiente para confirmar la detección. La distancia entre el detector y la superficie debe ser mantenida lo más pequeño posible.

En el procedimiento de medición, descrito en el documento [8], las instrucciones de operación relacionados con los instrumentos y los siguientes requerimientos deben ser cumplidos:

- i) antes de hacer una medición, la tasa de conteo de fondo debe de ser determinada en el lugar de la medición;
- ii) la tasa de conteo de fondo debe ser chequeada periódicamente;
- iii) la correcta funcionalidad del instrumento debe ser verificado utilizando una fuente de verificación adecuada. Frecuencia: diaria para instrumentos de uso frecuente, en otro caso, antes de utilizarlo. Desviaciones mayores de 25 % del valor acordado, debe de hacerse una recalibración al instrumento;
- iv) las condiciones geométricas durante la medición deben ser lo más cerca posible a los utilizados durante la calibración del instrumento, se pueden utilizar espaciadores removibles para este propósito;
- v) para mediciones precisas, el detector debe ser posicionado estacionariamente por tres veces el tiempo de respuesta;
- vi) valores de la eficiencia del instrumento, adecuado para radionucleidos a ser medidos, deben estar disponibles.

3. MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

A continuación se presenta el procedimiento de calibración para el instrumento Berthold LB 122 No. 165397-6847, describiendo la adquisición de datos y el procesamiento de los mismos, utilizando como guía base el método de medición directa descrito en la sección 2.2.

Para la realización de la calibración es necesario revisar el certificado de cada una de las cinco fuentes de radiación, con el objetivo de obtener el valor de actividad y tasa de emisión respectivo. Los valores de actividad y CPS de los certificados, tienen un error de 5 % y 3 % respectivamente. Estos datos se pueden observar en la *Tabla 3.1* que se muestra a continuación:

Tabla 3.1. Fuentes de emisión beta con su valor de actividad y conteos por segundo.

<i>Radionucleido</i>	<i>No. Certificado</i>	<i>Actividad [Bq]</i>	<i>CPS [s^{-1}]</i>	<i>Fecha de referencia</i>
^{14}C	029395	1,130	434	1 febrero 2016
^{60}Co	029396	765	415	27 enero 2016
^{137}Cs	029397	1,240	767	1 febrero 2016
^{36}Cl	029359	1,200	756	1 febrero 2016
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	029335	757	970	28 enero 2016

[†] Las cinco fuentes tiene una dimensión superficial de 100 mm × 100 mm y la tasa de emisión superficial tiene una geometría de 2π estereorradián.

[‡] Las cinco fuentes tienen trazabilidad al NIST.

La calibración se realiza con el fin de encontrar un factor que relacione la actividad y los conteos por segundo, a este factor se le llama *factor de calibración*. El factor de calibración resulta único para cada radioisótopo. La distancia de calibración desde la superficie de la fuente hacia la ventana del detector, es pequeña y usualmente es muy cercano a la distancia que se utilizará para mediciones subsiguientes de contaminación superficial [3].

3.1. Adquisición de Datos Crudos

El montaje del equipo y el procedimiento para la adquisición de datos crudos se describe a continuación:

1. Medición de fondo: la medición se realiza con la misma condición geométrica que se utiliza para realizar las mediciones de la calibración. Se posiciona el instrumento a una distancia de 5 mm del posicionador de fuentes planas utilizando los separadores como se observa en la *Figura 3.1*, pero con la diferencia que en la medición no se utiliza fuente de radiación.
2. Se enciende el instrumento de detección y se configura en modo CPS -B-, este modo se utiliza para detectar partículas beta para fuentes sin que algún factor intrínseco en el instrumento afecte las mediciones. Se mide los conteos por segundo cada 10 segundos por 4 minutos, obteniendo 24 datos en la medición. Los datos obtenidos se muestran en el Anexo C, *Tabla C.1*.
3. Medición con las fuentes planas: para la calibración utilizamos las cinco fuentes descritas en la *Tabla 3.1*. Debido que la fuente es más pequeña que el área de la ventana del detector, la fuente se posiciona en tres diferentes coordenadas con el objetivo de abarcar completamente el área de la ventana del detector. Las tres coordenadas en el posicionador de fuentes planas son: centrado en (2,B), (3,B) y (4,B).
4. Se posiciona la fuente plana en el posicionador de fuentes en la primera coordenada, centrado en (3,B) como se observa en la *Figura 3.2*. Las mediciones se realizan posicionando la ventana de detección del instrumento a una distancia de 5mm de separación con la fuente de radiación plana. El diagrama de posicionamiento del equipo se observa en la *Figura 3.1*.

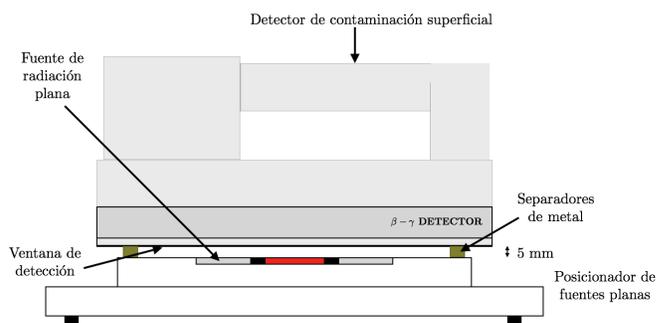


Figura 3.1. Vista frontal de la distribución del equipo en el proceso de medición de radiación de una fuente de radiación plana.

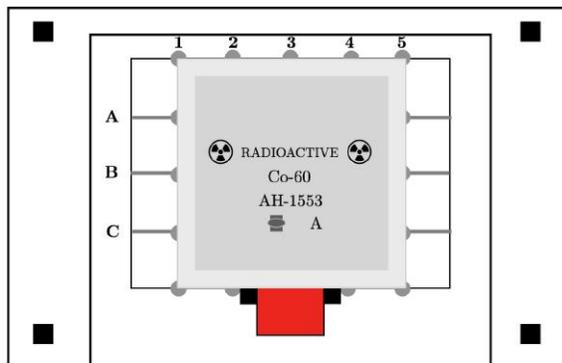


Figura 3.2. Vista superior de la colocación de la fuente de radiación en el posicionador de fuentes planas centrado en la coordenada (3,B).

5. Nuevamente las mediciones de datos se realizan con el instrumento en modo CPS -B- tomando datos cada 10 segundos por 4 minutos en una coordenada. Se realiza la medición en la primera coordenada (3,B). Se desplaza la fuente a la segunda coordenada (2,B) y se realiza la medición. Finalmente se desplaza la fuente plana a la tercera coordenada (4,B) y se mide. Resulta un total de 12 minutos de medición, obteniendo un total de 72 datos por cada fuente.
6. Los procedimientos 4. y 5. se realizan para las cuatro fuentes planas restantes. Los datos crudos originales obtenidos en la medición para cada fuente en su respectiva posición se presentan en el Anexo C, *Tablas C.2-C.6*.

3.2. Análisis de Datos

Una vez adquirido los datos para cada fuente de radiación, se procede a calcular el promedio con la ecuación B.1. Los promedios se puede observar en las tablas respectivas a cada fuente en el Anexo C.

Se procede a calcular el factor de calibración, que está definido de la siguiente forma

$$FC = \frac{S_A}{M - M_b} \quad (3.1)$$

donde S_A es la tasa de emisión superficial de la fuente [Bq cm^{-2}], M son los conteos por segundo del monitor expuesto a la fuente de radiación a una distancia específica [s^{-1}] y M_b son los conteos por segundo del fondo [s^{-1}].

La ecuación para calcular el factor de calibración (ecuación 3.1) está descrita en el SRS 16 del IAEA (documento [3]).

Para realizar el cálculo del factor de calibración para cada radionucleido, utilizamos los datos de la *Tabla 3.1* con el objetivo de calcular el valor de la tasa de emisión superficial, S_A , de cada fuente. La tasa de emisión superficial se calcula realizando el decaimiento de la actividad inicial de la fuente, desde la fecha de referencia, hasta la fecha de la medición, utilizando la ecuación 1.3. Este valor de actividad se divide por la dimensión de área de la fuente. Los resultados de estos cálculos se muestran en la *Tabla 3.2* que se presenta a continuación:

Tabla 3.2. Valores de actividad inicial, actividad a la fecha de 18-07-18 y actividad superficial de las cinco fuentes planas.

<i>Radionucleido</i>	<i>Actividad inicial</i> ($A_0 \pm 5\%$) [Bq]	<i>Actividad 18-07-18</i> ($A \pm 5\%$) [Bq]	<i>Actividad superficial</i> ($S_A \pm 5\%$) [Bq/cm ²]
¹⁴ C	1,130	1,130	11.3
⁶⁰ Co	765	552	5.52
¹³⁷ Cs	1,240	1,171	11.71
³⁶ Cl	1,200	1,200	12.0
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	757	713	7.13

Debido a la complejidad del esquema de decaimiento del Estroncio-90, *Figura 2.4.e*, la actividad de la fuente de Estroncio-90 a la fecha de 18-07-18, con valor de 713 Bq, no es el valor de actividad que se utiliza para el cálculo de su factor de calibración. La explicación y el cálculo se encuentran en el Anexo D. La actividad resulta con valor de 1,426 Bq, por lo tanto, la actividad superficial cambia a un valor de 14.26 Bq/cm².

3.2.1. Cálculo de Incertidumbre

El cálculo de incertidumbre para el factor de calibración, para cada una de las fuentes, se realiza utilizando los lineamientos definidos en el Anexo A.

El error asignado al valor promedio de los datos adquiridos de fondo y de cada fuente, se calcula realizando la desviación estándar muestral definida por la ecuación B.2. Por lo tanto, la ecuación del error del promedio de fondo es

$$u(M_b) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(24 - 1)}} \quad (3.2)$$

y la ecuación para calcular el error asignado al promedio de los datos es

$$u(M) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(72 - 1)}} \quad (3.3)$$

La ecuación anterior se aplica individualmente a cada promedio obtenido de la medición a cada fuente, cada promedio tendrá asignado un error diferente.

La incertidumbre combinada estándar se calcula utilizando la ecuación B.4 aplicado a la ecuación del factor de calibración (ecuación 3.1). La ecuación resultante es

$$u_c(FC) = \sqrt{\frac{1}{(M - M_b)^2} u^2(S_A) + \frac{S_A^2}{(M - M_b)^4} u^2(M) + \frac{S_A^2}{(M - M_b)^4} u^2(M_b)} \quad (3.4)$$

La incertidumbre expandida se calcula utilizando la ecuación B.6, tomando el factor de cobertura como $k = 2$ asegurando un nivel de confiabilidad de 95 %. La incertidumbre expandida para el factor de calibración resulta de la siguiente forma

$$U = 2 u_c(FC) \quad (3.5)$$

Vale la pena resaltar, que el cálculo de las incertidumbres, incertidumbre combinada estándar e incertidumbre expandida, se realiza respectivamente para los valores individuales del factor de calibración de las cinco fuentes planas.

Se procede a calcular la incertidumbre combinada estándar para la eficiencia:

$$u_c(\epsilon_{abs}) = \sqrt{\frac{u^2(M)}{D_t^2} + \frac{u^2(M_b)}{D_t^2} + \frac{(M - M_b)^2 u^2(D_{teo})}{D_t^4}} \quad (3.6)$$

La incertidumbre expandida se calcula tomando el factor de cobertura como $k = 2$. La ecuación de la incertidumbre expandida para la eficiencia resulta

$$U = 2 u_c(\epsilon_{abs}) \quad (3.7)$$

3.2.2. Ajuste para la relación entre el Factor de Calibración y Eficiencia

Para calcular el ajuste para la relación entre el factor de calibración y la eficiencia absoluta, se procede a graficar el factor de calibración respecto a la eficiencia absoluta, con el objetivo de verificar que la relación entre ambas es inversamente proporcional, es decir:

$$FC \propto \frac{1}{\epsilon_{abs}} \quad (3.8)$$

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del análisis del factor de calibración para las fuentes planas de C-14, Co-60, Cs-137, Cl-36 y Sr-90, y la eficiencia del instrumento LB 122 No. 165397-6847.

4.1. Factores de Calibración para cada Fuente Plana

En el manual del instrumento LB 122 No. 165397-6847 (documento [2]) se encuentra una lista de factores de calibración para cada radionucleido. Estos valores son utilizados únicamente como comparación con los factores de calibración calculados en este trabajo. Los valores del factor de calibración del manual (FC manual) y los factores de calibración obtenidos en la medición (FC), junto con sus incertidumbres, se observan en la *Tabla 4.1*.

Tabla 4.1. Factor de Calibración de los diferentes radionucleidos.

<i>Radionucleido</i>	<i>Energía</i> [keV]	<i>FC manual</i> [Bq·s/cm ²]	<i>FC</i> [Bq·s/cm ²]	<i>U</i> [Bq·s/cm ²]
¹⁴ C	156.475	0.567	0.569 ± 6 %	12 %
⁶⁰ Co	317.88	0.105	0.102 ± 5 %	10 %
¹³⁷ Cs	514.03	0.060	0.059 ± 5 %	10 %
³⁶ Cl	709.55	0.050	0.049 ± 5 %	10 %
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	2280.1	0.045	0.045 ± 5 %	10 %

Con los resultados de la tabla anterior se realizó una grafica para observar el comportamiento de la energía respecto al valor del factor de calibración, respectivo a cada fuente. Esta comparación se muestra en la *Figura 4.1*.

Relación Factor de Calibración y Energía

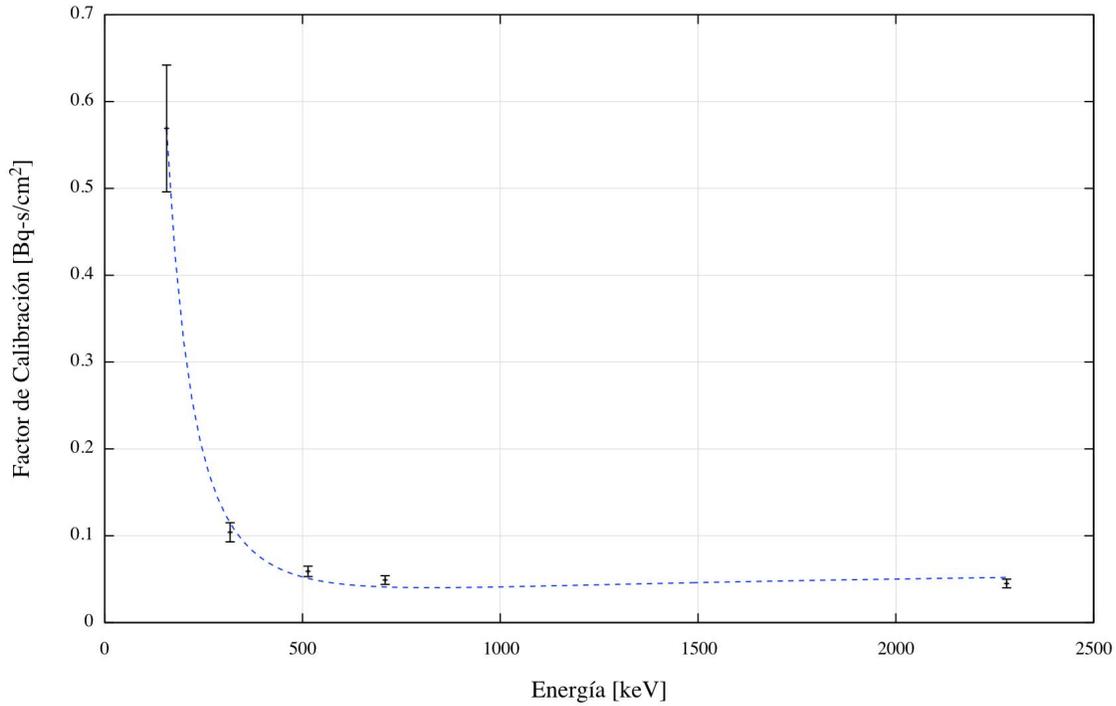


Figura 4.1. Comportamiento entre la energía máxima beta y el factor de calibración de las cinco fuentes planas.

4.2. Eficiencia del Instrumento de Detección

Los resultados del cálculo de la eficiencia del detector para cada fuente plana, se presentan en la *Tabla 4.2* y el comportamiento de la eficiencia respecto a la energía de cada fuente, se muestra en la *Figura 4.2*.

Tabla 4.2. Valores de las eficiencias.

<i>Radionucleido</i>	<i>Energía [keV]</i>	<i>Eficiencia absoluta</i>	<i>U</i>
¹⁴ C	156.475	0.046 ± 5%	10%
⁶⁰ Co	317.88	0.181 ± 3%	6%
¹³⁷ Cs	514.03	0.275 ± 3%	6%
³⁶ Cl	709.55	0.322 ± 3%	6%
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	2280.1	0.348 ± 3%	6%

Relación Eficiencia absoluta y Energía

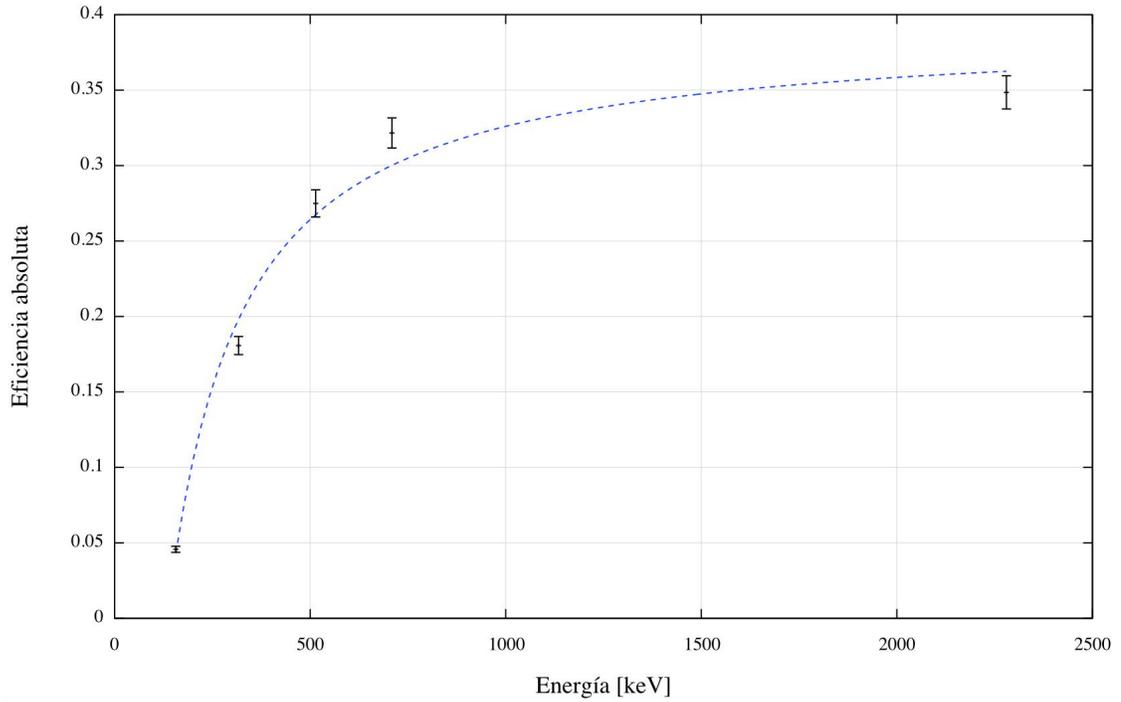


Figura 4.2. Comportamiento entre la energía máxima beta y la eficiencia de las cinco fuentes planas.

4.3. Relación entre el Factor de Calibración y la Eficiencia

Se realizó la grafica del factor de calibración respecto a la eficiencia absoluta, *Figura 4.3*, para observar la relación entre ambas, sabiendo que la relación proporcional entre ambas está definida por la ecuación 3.8. El mejor ajuste del comportamiento entre los datos del factor de calibración y la eficiencia absoluta es de la siguiente forma

$$FC = a + \frac{b}{\epsilon_{abs}} \tag{4.1}$$

El ajuste definido por la ecuación 4.1, se aplicó a los datos de la comparación, los resultados del ajuste se presentan en la *Tabla 4.3*.

Tabla 4.3. Resultados del ajuste.

<i>Parámetros finales</i>	<i>Valor [Bq-s/cm²]</i>	<i>Error estándar</i>
a	= -0.0408192	± 0.004254 (10.42 %)
b	= 0.0278283	± 0.0004094 (1.471 %)

Relación Factor de Calibración y Eficiencia absoluta

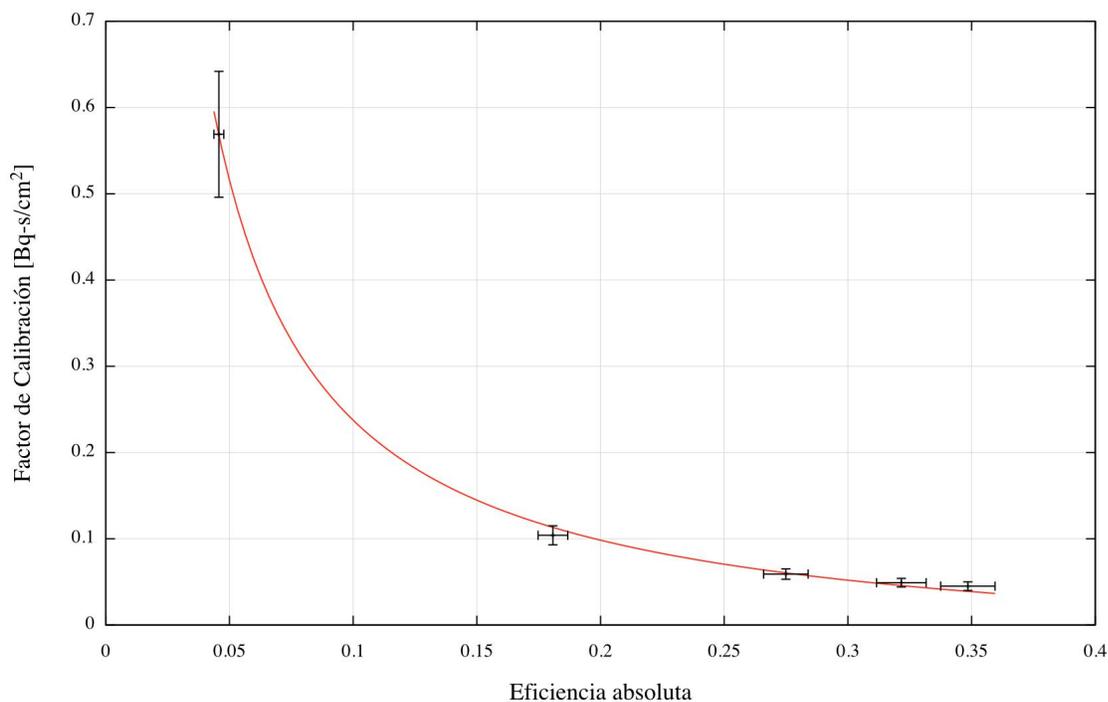


Figura 4.3. Relación y ajuste, utilizando la ecuación 4.1, entre el factor de calibración y la eficiencia del instrumento. Los datos del factor de calibración y de la eficiencia absoluta se encuentran en la *Tabla 4.1* y *Tabla 4.2*, respectivamente.

Utilizando los valores de los parámetros de la *Tabla 4.3*, resulta que la ecuación que relaciona el factor de calibración y la eficiencia absoluta es

$$FC = -0.0408192 + \frac{0.0278283}{\epsilon_{abs}} \quad (4.2)$$

Poniendo a prueba la ecuación 4.2, se analiza la ecuación aplicando condiciones de frontera, siendo las dos condiciones: a) $FC=0$ y b) $\epsilon_{abs} = 1$. En el caso a), se obtiene que la eficiencia absoluta resulta con un valor de 0.682. En el caso b), se obtiene un valor del factor de calibración de -0.013 Bq-s/cm^2 .

Se observa de los resultados que la ecuación tiene una restricción. La ecuación se aplica solamente cuando la eficiencia absoluta es:

$$0 < \epsilon_{abs} < 0.682$$

4.4. Discusión de Resultados

El procedimiento de calibración detallado en este trabajo tiene la veracidad que la respuesta del instrumento LB 122 No. 165397-6847 para contaminación superficial son calculables para los radionucleidos de emisión beta con trazabilidad a un patrón primario, debido a que los factores de calibración de la *Tabla 4.1* presentan resultados congruentes al compararlos con los factores del manual del instrumento. También, se comprobó que en la relación del área de detección del instrumento y el tamaño de área de la fuente plana, en este caso la fuente plana es más pequeña que la ventana de detección, la calibración se debe realizar posicionando la fuente plana en diferentes áreas cubriendo la mayor parte posible de la ventana del detector.

Con el instrumento de detección calibrado, éste se utiliza para medir alguna posible contaminación superficial. El instrumento medirá la contaminación en tasa de emisión (conteos por segundo) y resulta útil conocer el valor de la actividad superficial. Con los factores de calibración determinados, se logra realizar la conversión de los valores de tasa de emisión (conteos por segundo) a actividad superficial por medio de la siguiente ecuación:

$$S_A = FC \cdot CPS \quad (4.3)$$

Cabe notar que la ecuación anterior (ecuación 4.3) se utiliza exclusivamente cuando se sabe el radionucleido contaminante y el factor de calibración del mismo.

Comparando el factor de calibración y la energía de cada radionucleido, *Figura 4.1*, se observa que el factor de calibración tiende a ser mayor cuando se trata con radionucleidos de bajas energía, como es el caso de C-14. El factor de calibración decrece cuando el radionucleido emite partículas beta de mayor energía, como sucede para el Sr-90/Y-90. En relación a la eficiencia y la energía de cada radionucleido, *Figura 4.2*, se observa que los valores de eficiencia incrementan cuando la energía del radionucleido es mayor, contrario a lo que sucede con el factor de calibración.

Finalmente, en la comparación entre el factor de calibración y la eficiencia que se observa en la *Figura 4.3*, los datos tienen un comportamiento inverso de primer orden más una constante, cuyo modelo matemático definido en la sección 3.2.2 fue utilizado en los datos para encontrar una relación entre ambas.

Del ajuste aplicado a la gráfica, resultó que la relación tiene la forma descrita por la ecuación 4.2 con parámetros con valores de $a = -0.0408192$, que representa un valor de corrección y $b = 0.0278283$, que representa el valor que delimita el rango de validez de la eficiencia absoluta. La ecuación tiene la restricción que solamente es aplicable a un rango de eficiencia absoluta entre $0 < \epsilon_{abs} < 0.682$, debido a que los radionucleidos utilizados en este trabajo son fuentes para aplicaciones radiológicas.

CONCLUSIONES

1. Se calcularon experimentalmente los factores de calibración para las cinco fuentes radiactivas planas, obteniendo resultados muy similares a los descritos en el manual del instrumento.
2. Los instrumentos de contaminación superficial captan con mayor eficiencia las partículas beta de más energía que las débiles.
3. Se confirma que para las aplicaciones radiológicas, la relación entre el factor de calibración y la eficiencia absoluta es inversamente proporcional cuando se busca la eficiencia absoluta en un rango de $0 < \epsilon_{abs} < 0.682$. Sin embargo, debe aplicarse una constante de corrección $a = -0.0408192$ para éste instrumento.
4. Se confirma que, en el caso que la fuente de radiación sea más pequeña que la ventana de detección del instrumento, se debe colocar la fuente de radiación en diferentes posiciones, cubriendo toda el área de la ventana del instrumento.

RECOMENDACIONES

1. Revisar los esquemas de decaimiento de los radionucleidos a utilizar debido a que algún radionucleido puede tener un esquema de decaimiento complejo, sí así fuera el caso, se debe analizar la actividad de la fuente por medio de la teoría de equilibrios en la actividad padre e hija.
2. Seguir los lineamientos presentados en los documentos de las organizaciones internacionales como el OIEA, ICRP e ISO, entre otros, para minimizar riesgos en exposición a radiación y seguir las metodologías adecuadas para calibrar instrumentos de detección.

ANEXOS

A. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

En esta sección, se resume las medidas fundamentales de la protección radiológica. Se desarrollará los efectos biológicos de la radiación y la seguridad en la manipulación de fuentes radiactivas y en la medición de contaminación superficial.

A.1. Protección Radiológica

Debido al uso de la radiación ionizante en el ámbito de la medicina e industria, existen varios riesgos para la salud de las persona y el medio ambiente, resultando en enfermedades y hasta efectos biológicos, manifestado en el sujeto o efectos hereditarios. Instituciones internacionales como la IAEA (International Agency of Atomic Energy), el ICRP (International Commission of Radiation Protection) y la ICRU (International Commission of Radiation Unit and Measurement) han publicado recomendaciones y datos para calcular las cantidad de radiación depositada en la materia, los límites de dosis de radiación que una persona puede recibir y las dosis aceptables para tratamientos médicos. La IAEA en el documento [4] define la protección radiológica y la seguridad nuclear como “la protección de personas y el medio ambiente contra riesgos de radiación, y la seguridad de las instalaciones y actividades que da lugar a riesgos de radiación”.

Las recomendaciones de protección radiológica de la ICRP en el documento [7], se aplican a todas la fuentes y a individuales expuestos a radiación en tres tipos de situaciones diferentes de exposición:

- *Exposición planeada*: son situaciones que involucran la deliberada introducción y operación de fuentes. La exposición planeada resulta en una exposición que es anticipada a ocurrir (exposiciones normales) y a exposiciones no anticipadas (exposiciones potenciales).

- *Exposición de emergencia*: son situaciones que pueden ocurrir durante la operación de una situación planeada o en acto de maldad u otra situación inesperada y requiere de acción urgente para evitar o reducir consecuencias indeseables.
- *Exposición existente*: son situaciones existentes cuando una decisión en control debe ser tomada, incluyendo situaciones de exposición prolongada, después de una emergencia.

Existen varios principios fundamentales de protección radiológica que se aplican a situaciones planificadas, de emergencia y de exposición existente. Dos principios son relacionados con la fuente y es aplicado en todas las situaciones de exposición, y un tercer principio es relacionado con el individuo y aplicado a situaciones de exposición planificada. Los tres principios son:

1. *El principio de justificación*: cualquier decisión que altere la situación de exposición de radiación debe hacer más bien que daño.
2. *El principio de optimización de protección*: la probabilidad de incurrir en exposiciones, el número de personas expuestas y la magnitud de sus actividades individuales deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores económicos y sociales.
3. *El principio de aplicación de límites de dosis*: la dosis total a un individuo proveniente de fuentes reguladas en situaciones de exposición planificadas, que no sean exposiciones médicas de pacientes, no debe exceder los límites apropiados recomendados por la ICRP.

A.1.1. Clasificación del Personal Expuesto y Límites de Dosis

La ICRP diferencia las exposiciones en tres categorías: exposición ocupacional, exposición pública y exposición médica a pacientes.

- *Exposición ocupacional*: es toda exposición radiactiva a trabajadores como resultado de su trabajo. Involucra todos los agentes peligrosos, incluyendo todas las exposiciones en el trabajo, sin importar de donde proviene. Todos los trabajadores deben estar sujetos a un régimen de protección radiológica.
- *Exposición pública*: comprende toda exposición del público como resultado del rango de las fuentes de radiación. El más común es la exposición debido a fuentes naturales.

- *Exposición médica a pacientes*: la radiación a pacientes ocurre en diagnósticos, intervención y procedimientos terapéuticos. Hay varias características de prácticas radiológicas en medicina, que requiere una aproximación que difiere de la protección radiológica en otras situaciones de exposición planeadas. La exposición es intencional y para el beneficio del paciente.

Los límites de dosis nos ayudan a asegurarnos que una persona no sea expuesta a una dosis de radiación excesiva en situaciones planificadas. La ICRP ha publicado documentos sobre los límites de dosis para proveer un nivel apropiado de protección, estos límites se aplican solamente en una situación de exposición planeada, no se aplican a la exposiciones medicas de pacientes. Los límites de dosis se encuentran en el documento ICRP 103 [7, Tabla 6], se resumen en la *Tabla A.1*.

Tabla A.1. Límites de dosis recomendadas en situaciones de exposición planeadas.

<i>Tipo de límite</i>	<i>Ocupacional</i>	<i>Público</i>
Dosis efectiva	20 mSv por año	1 mSv por año
Dosis equivalente anual en:		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	-

A.2. Efectos Biológicos de la Radiación ionizante

Los efectos de la radiación ionizante dependen del tipo de radiación, en la dosis de radiación y que tanto tiempo una parte del cuerpo ha sido expuesto a radiación. La extensión del daño por radiación se ve afectada por la distribución de la dosis y por la capacidad de recuperación del organismo expuesto [12].

Los efectos biológicos puede ser somático, si se manifiesta en el sujeto irradiado, o genético (hereditario), si aparecen solamente en los descendientes. Los efectos de radiación son iniciados por la absorción de la energía de radiación ionizante en el tejido irradiado; la manifestación máxima del daño es el resultado de una reacción en cadena en la que participan tres tipos de procesos sucesivos: proceso físico, proceso químico y cambios funcionales y morfológicos.

Ambos efectos directos e indirectos de la radiación en materia viva, puede resultar en una alteración biológica en el organismo expuesto. Los tipos de daños de radiación que ocurren en varios niveles de organización biológica son:

- Molecular: deterioro de la integridad de macromoléculas como enzimas, ácidos ribonucleicos y desoxirribonucleicos; trastorno de los procesos metabólicos.
- Subcelular: daño a membranas celulares, núcleo celular, cromosomas, mitocondria y lisosomas.
- Celular: bloqueo de división celular, muerte celular, malignización de células.
- Tejido, órgano: falla sistemática (sistema nervioso central, sangre, formación de tejido) con posible resultado letal.
- Todo el organismo: muerte, acortamiento de la vida.
- Población: alteración genética debido a mutación del gen y del cromosoma.

A.3. Seguridad en la Manipulación de Fuentes Radiactivas

Como parte de uno de los principios de la protección radiológica, la optimización de protección, una de las recomendaciones que varias instituciones internacionales han aplicado al trabajar con radiación es el principio ALARA (del inglés, As Low As Reasonably Achievable), su definición en español es, “tan bajo como sea razonablemente posible”. El objetivo del principio ALARA es evitar que se desarrollen efectos estocásticos al estar expuesto a radiación. Se utilizan tres criterios para reducir la dosis total recibida: *distancia*, mientras más lejos de la fuente radiactiva menor será la dosis recibida, *blindaje*, reduce la dosis a niveles bajos y *tiempo*, menor tiempo cerca de la fuente menor será la dosis. En la *Figura A.1* se puede observar, el esquema y la descripción de los tres criterios del principio ALARA.



Figura A.1. Esquema y descripción del principio ALARA.

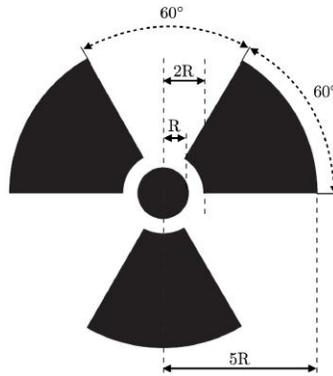


Figura A.2. Símbolo recomendado por la OIEA en presencia de radiación ionizante.

En presencia de radiación ionizante, se debe utilizar el símbolo internacional de advertencia sobre la existencia de una fuente radiactiva. El símbolo es un *trisector* y se ilustra en la *Figura A.2*. Para radiación ionizante el símbolo es de color negro con un fondo amarillo.

A.4. Protección Radiológica para Contaminación Superficial

Existen peligros potenciales en presencia de radiación debido a contaminación superficial. La radiación puede ser inhalada o transferida por contacto o puede penetrar la piel resultando en una irradiación interna. En el caso de emisores beta o gamma, también puede existir una irradiación externa. La radiación beta tiene suficiente energía para ionizar materia, una partícula beta de 1 MeV puede desplazarse aproximadamente 3.5 metros en aire. Estos pueden penetrar dentro del cuerpo y depositar una dosis a estructuras internas. Por lo tanto, se necesita un blindaje con mayor absorción. En la *Figura A.3* se muestran los diversos tipos de radiación y el material a utilizar como blindaje, para la radiación respectiva.

Para prevenir la dispersión de los contaminantes radiactivos y asegurar que la contaminación superficial sea tan bajo, como sea razonablemente posible, bajo rutinas de transporte o en manipulación y que esté por debajo de los límites de contaminación, se deben monitorizar periódicamente los paquetes, contenedores, componentes, equipo y en algunos casos al personal. Los programas de monitoreo para contaminación superficial, pueden ayudar a detectar fallas en los contenedores o desviaciones en un procedimiento de operación correcto.

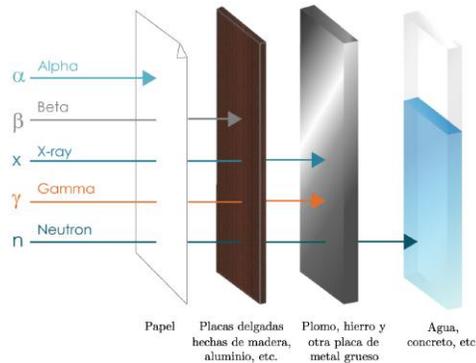


Figura A.3. Tipos de radiación y penetración. (Ref: Mirion Technologies, types of ionizing radiation).

Los criterios para controlar la contaminación superficial, fija o no fija en áreas de trabajo y equipamientos, deben ser identificados en el programa de protección radiológica (RPP, Radiological Protection Programme) definiendo el tipo de radiación y su extensión. La aproximación convencional sobre la rutina de monitoreo de la contaminación superficial se provee en la IAEA SSS No. RS-G-1.1 [5, párrs. 5.39-5.48].

En el caso de contacto directo con la fuente, las medidas específicas de protección dependen de la radiotoxicidad y la actividad de los radionucleidos y se establecen actuando, tanto sobre las estructuras, instalaciones y zonas de trabajo, como sobre el personal, mediante la adopción de métodos de trabajo seguros y el empleo de equipos de protección individual adecuados. Las precauciones generales a tener en cuenta para reducir la contaminación son: a) Emplear la mínima cantidad posible de radionucleido necesaria para el resultado que se quiera conseguir, b) utilizar sistemas de confinamiento y retención como bandejas o cubiertas con material absorbente, c) utilizar el detector y d) cumplir con las normas de trabajo.

B. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES

Las incertidumbres se trabajarán utilizando la terminología que se definen en la guía [9] preparada por la organización Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). Esta guía provee varias definiciones para estimar las incertidumbres en la medición en un proceso de radiación.

En el cálculo de la incertidumbre de las mediciones se consideran dos clasificaciones para las componentes de la incertidumbre, generalmente clasificados como Tipo A y Tipo B, dependiendo del método para evaluarlos.

- **Tipo A:** cualquier método para evaluar la incertidumbre utilizando análisis estadístico de una serie de observaciones (por ejemplo, datos estadísticos de los resultados de control de calidad).
- **Tipo B:** método para evaluar incertidumbre por otros medios que no sean análisis estadísticos de una serie de observaciones (por ejemplo: datos obtenidos de un certificado de calibración o información asociada con una cantidad numérica publicada autorizada).

B.1. Media Aritmética y Distribución Estándar Muestral

En una serie de n mediciones, con valores observados x_i (donde x_i son los valores individuales de los parámetros $i = 1, 2, 3, \dots, n$), la mejor estimación de la cantidad x es usualmente dado por la media aritmética o promedio:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{B.1})$$

La dispersión de los valores medidos alrededor de la media x puede ser caracterizado por la distribución estándar muestral, que es la suma de las desviaciones al cuadrado de las observaciones de su promedio dividido por $(n - 1)$, está dado por la expresión:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (\text{B.2})$$

y la cantidad $s^2(x_i)$ es llamada la varianza empírica de una sola medición, basado en una muestra de tamaño n .

B.2. Incertidumbre Combinada Estándar e Incertidumbre Expandida

En la mayoría de los casos, una medición no se realiza directamente, este es determinado por otras n cantidades con una relación funcional f :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{B.3})$$

La incertidumbre estándar de y es estimada combinando apropiadamente las incertidumbres individuales de las variables x_1, x_2, \dots, x_n . A esta estimación se le llama *incertidumbre combinada estándar*, denotado como $u_c(y)$, se obtiene combinando las incertidumbres individuales estándar $u(x_i)$ resultando de una evaluación Tipo A o una evaluación Tipo B. Este método es usualmente llamado *ley de la propagación de incertidumbre*.

La incertidumbre combinada estándar de la función f con sus respectivas desviaciones estándar independientes $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_n)$, está definido como

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u^2(x_n)} \quad (\text{B.4})$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \quad (\text{B.5})$$

Se nota que las ecuaciones anteriores (A.4 y A.5) son equivalentes.

Utilizando $u_c(y)$ podemos expresar la incertidumbre del resultado de una medición, en algunas aplicaciones industriales, comerciales o en aplicaciones regulativas, es necesario dar una medición de la incertidumbre que define un intervalo sobre la medición del resultado que se espera que abarque una gran fracción de la distribución de valores que razonablemente podría atribuirse al mensurando.

La medida de incertidumbre que provee un intervalo es llamado *incertidumbre expandida* y es denotado por U . La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada estándar $u_c(y)$ por un *factor de cobertura*, con símbolo k :

$$U = k u_c \quad (\text{B.6})$$

En general, el valor del factor de cobertura k , se escoge basado en el nivel de confiabilidad deseado. Típicamente k está en el rango de 2 a 3. Cuando $U = 2u_c$ ($k = 2$) define un intervalo de un nivel de confiabilidad de aproximadamente 95 % y cuando $U = 3u_c$ ($k = 3$) define un intervalo que tiene un nivel de confiabilidad de mayor de 99 %. Finalmente el resultado de una medición es convenientemente expresado como $y \pm U$.

B.3. Cálculo de la Incertidumbre

A continuación se presenta el presupuesto de incertidumbre listando los componentes de la incertidumbre. Este presupuesto representa la incertidumbre asociada con las mediciones utilizando las fuentes de radiación para la calibración del instrumento LB 122 No. 165397-6847.

Tabla B.2. Cálculo de la incertidumbre de la calibración.

<i>Componente de incertidumbre</i>	<i>Distribución de probabilidad</i>	<i>Incertidumbre</i>	
		<i>Tipo A</i>	<i>Tipo B</i>
Valores de emisión del certificado de la fuente:			
Actividad	Normal		5 %
CPS	Normal		3 %
Incertidumbre combinada del factor de calibración:			
C-14		6 %	
Co-60		5 %	
Cs-137		5 %	
Cl-36		5 %	
Sr-90/Y-90		5 %	
Incertidumbre expandida ($k = 2$) del factor de calibración:			
C-14		12 %	
Co-60		10 %	
Cs-137		10 %	
Cl-36		10 %	
Sr-90/Y-90		10 %	
Fit curva de FC vs. Eficiencia			
a	Normal	10.42 %	
b	Normal	1.471 %	

C. DATOS DE MEDICIÓN DE FONDO Y DE FUENTES PLANAS

Los valores de los datos crudos obtenidos en la medición de fondo y en la medición para las cinco fuentes planas, en su respectiva coordenada (las coordenadas se pueden observar en el posicionador de fuentes planas, sección 2.1.3), se muestran a continuación:

Tabla C.1. Datos de medición de fondo.

$CPS [s^{-1}]$	$CPS [s^{-1}]$	$CPS [s^{-1}]$	$CPS [s^{-1}]$
14.4	14.6	14.9	15.3
14.2	14.8	14.9	15.2
14.3	14.9	15.0	15.2
14.2	14.8	15.1	15.3
14.4	15.0	15.2	15.2
14.5	14.9	15.3	15.3

[†] El promedio resulta con valor de $M_b = 14.9 \pm 2\%$.

Tabla C.2. Datos obtenidos para la fuente de C-14.

Carbono-14		
<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]
Coor. (2,B)	Coor. (3,B)	Coor. (4,B)
34.8	34.6	33.5
34.8	34.7	33.8
34.7	34.9	33.9
34.5	34.9	33.9
34.8	34.9	33.9
34.5	34.9	34.0
34.6	34.8	34.1
34.6	35.1	34.2
34.3	35.1	34.6
34.2	35.2	34.8
34.3	35.3	34.9
34.2	35.5	35.4
34.0	35.4	35.6
33.8	35.3	35.9
33.6	35.1	36.0
33.6	35.0	35.8
33.6	35.0	35.7
33.5	35.1	35.6
33.5	34.9	35.7
33.8	34.8	35.7
33.7	35.0	35.7
33.8	35.2	36.0
33.9	35.1	35.8
33.7	35.0	35.6

[†] El promedio de los datos es $M = 34.7 \pm 2\%$ cps.

Tabla C.3. Datos obtenidos para la fuente de Co-60.

Cobalto-60		
<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]
Coord. (2,B)	Coord. (3,B)	Coord. (4,B)
67	69.9	68
68	69.8	69
69	69.8	70
69	70.3	69
69	69.9	69
70	69.6	69
69	69.3	70
69	69.2	70
70	69.0	70
70	68.8	70
69	68.6	70
70	68.4	69
69	68.9	68
69	68.3	69
69	68.4	68
69	68.5	68
69	68.5	69
69	68.9	67
69	68.7	70
69	68.5	69
68	68.6	70
69	70.0	69
69	69.0	69
69	68.6	80

[†] El promedio de los datos es $M = 69.0 \pm 1\%$ cps.

Tabla C.4. Datos obtenidos para la fuente de Cs-137.

Cesio-137		
<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]
Coor. (2,B)	Coor. (3,B)	Coor. (4,B)
216	215	213
216	213	214
216	211	214
216	212	214
215	210	215
215	210	215
214	211	215
214	211	215
214	211	215
214	211	215
215	211	215
216	214	216
216	212	215
215	212	215
216	212	216
216	213	216
216	213	216
216	213	216
216	213	215
215	213	215
215	213	215
215	214	215
215	213	215
214	211	214

† El promedio de los datos es $M = 214 \pm 1\%$ cps.

Tabla C.5. Datos obtenidos para la fuente de Cl-36.

Cloro-36		
<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]
Coord. (2,B)	Coord. (3,B)	Coord. (4,B)
260	255	255
258	258	256
259	259	255
260	259	255
262	259	256
261	260	256
262	260	256
261	258	256
260	259	256
260	259	256
260	259	253
259	259	254
260	258	253
260	258	254
261	259	253
262	259	254
261	259	254
261	258	254
263	257	254
254	258	254
263	258	255
263	260	256
262	258	255
263	259	256

[†] El promedio de los datos es $M = 258 \pm 1\%$ cps.

Tabla C.6. Datos obtenidos para la fuente de Sr-90.

Estroncio-90		
<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]	<i>Datos</i> [cps]
Coor. (2,B)	Coor. (3,B)	Coor. (4,B)
333	340	334
334	338	332
332	337	332
334	337	331
334	335	330
333	334	330
332	336	330
333	337	330
334	339	329
333	338	330
332	338	329
333	337	330
333	337	330
335	336	329
336	336	327
335	338	327
333	337	326
334	336	329
334	335	328
335	334	330
335	333	330
336	333	332
337	333	332
337	333	332

[†] El promedio de los datos es $333 \pm 1\%$ cps.

D. DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DEL Sr-90/Y-90

Debido a que el Itrio-90 tiene un periodo de semidesintegración corto, la tasa de emisión beta, depende de la tasa a la que es producida y es determinada por el periodo de semidesintegración del Estroncio-90. Esto se puede observar en la relación radiactiva entre el nucleido padre e hija. La relación de la actividad entre ambos depende de las constantes de decaimiento del padre (λ_1) y de la hija (λ_2).

Si un núcleo tiene más de un posible modo de desintegración (por ejemplo diferentes productos hija), la actividad total se escribe como la suma de las actividades parciales

$$A = A_1 + A_2 + \dots \quad (\text{D.1})$$

D.1. Nucleido Hija con Vida Muy Corta que el Padre

Para este caso la relación entre las constantes de decaimiento es $\lambda_2 \gg \lambda_1$. Para tiempos largos ($t \gg \tau_2$) la razón del valor de la actividad entre hija/padre es

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \simeq 1 \quad (\text{D.2})$$

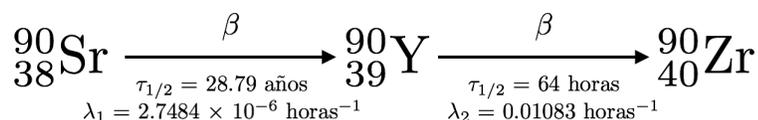
La actividad de la hija se aproxima a la del padre y ellos decaen juntos a la misma tasa que el padre. Este caso especial donde la actividad de la hija y el padre son prácticamente iguales, es comúnmente llamado *equilibrio secular* [1].

D.2. Cálculo de la Actividad del Sr-90/Sr-90

Para nuestro caso, esta relación se da con el radionucleido Sr-90 como padre, decae a Itrio-90 como hija y luego a Zr-90:

Por lo tanto, la ecuación D.2 resulta

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{0.01083}{0.01083 - 2.7484 \times 10^{-6}} = 1.0002 \simeq 1$$



Teniendo en cuenta que la actividad del nucleido Sr-90 y del Y-90 son iguales, se utiliza la ecuación D.1, para obtener el valor de actividad total a utilizar, para los cálculos del factor de calibración. Utilizando el valor de la actividad de fecha 18-07-18 calculado en la *Tabla 3.2*, resulta la misma para ambos nucleidos

$$A = 713 + 713 = 1,426$$

Finalmente, la actividad total es 1,426 Bq.

E. DESCLASIFICACIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS

Las fuentes más comunes de medicina nuclear para diagnóstico y tratamiento utilizados en Guatemala son: I-125, I-131 y Tc-99m. Debido a que las fuentes se administran por medio de una solución líquida, se buscan los niveles de desclasificación para líquidos. Las normativas de la desclasificación de desechos radiactivos se encuentran en el documento: “Reglamento de Gestión de Desechos Radiactivos - Acuerdo Gubernativo Número 176-2015” (documento [13]). Según la normativa guatemalteca:

“**Artículo 110: Niveles de desclasificación para desechos líquidos.** En la tabla No.2 se presentan los niveles de desclasificación para los desechos radiactivos líquidos que contienen o están contaminados con los radioisótopos más utilizados en las instalaciones radiactivas que se encuentran localizadas en el país.

Tabla E.1. Tabla No.2 - Niveles de Desclasificación para desechos líquidos.

<i>Radioisótopos</i>	<i>Nivel de Desclasificación</i> (Bq/a)	<i>Radioisótopos</i>	<i>Nivel de Desclasificación</i> (Bq/a)
^3H	1×10^{12}	^{14}C	1×10^{10}
^{32}P	1×10^6	^{35}S	1×10^9
^{45}Ca	1×10^{10}	^{99m}Tc	1×10^9
^{22}Na	1×10^5	^{99}Mo	1×10^8
^{51}Cr	1×10^8	^{111}In	1×10^8
^{57}Co	1×10^9	^{123}In	1×10^9
^{58}Co	1×10^8	^{125}In	1×10^8
^{59}Fe	1×10^6	^{131}In	1×10^7
^{85}Sr	1×10^6	^{201}Tl	1×10^8
^{89}Sr	1×10^9	^{226}Ra	1×10^6
^{90}Y	1×10^{10}		

Para el resto de radioisótopos, en que se tenga duda, se utilizarán supletoriamente los valores recomendados por el documento técnico IAEA-TECDOC 855 o por la Guía de Protección Radiológica y Seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica (Colección de normas de seguridad del OIEA, No. GSR, Parte 3)”.

Dado que en el Artículo 110 dos de los radioisótopos de interés, I-125 e I-131, no están listados en la tabla No.2; se procedió a buscar los valores en el documento técnico IAEA-TECDOC-1000 (documento [6]). Se encontró que la actividad anual (Bq/a) para el radionucleido I-125, es 1×10^8 Bq/a y para I-131, es 1×10^7 Bq/a. Por lo tanto, los niveles de desclasificación de desechos líquidos para los tres radioisótopos de interés para medicina nuclear se presentan la *Tabla E.2*.

Tabla E.2. Radioisótopos más comunes de medicina nuclear.

<i>Radioisótopos</i>	<i>Nivel de Desclasificación (Bq/a)</i>
^{99m}Tc	1×10^9
^{125}I	1×10^8
^{131}I	1×10^7

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Frank H. Attix. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. WILEY_VCH, Weinheim, 2004.
- [2] Berthold Technologies. *Operating Manual Contamination-Monitor LB 122 2nd ed.* BERTHOLD TECHNOLOGIES GmbH & Co. KG, Germany, 2001.
- [3] International Atomic Energy Agency. *Safety Report Series No. 16, Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments*. IAEA, Vienna, 2000.
- [4] International Atomic Energy Agency. *Terminology used in Nuclear Safety and Radiation*. IAEA, Vienna, 2007.
- [5] International Atomic Energy Agency. *Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series, No. RS-G-1.1*. IAEA, Vienna, 2007.
- [6] International Atomic Energy Agency. *TECDOC-1000, Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research*. IAEA, Vienna, 1998.
- [7] International Commission on Radiological Protection. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, ICRP Publication 103*. Elsevier, New York, 2007.
- [8] ISO Standard 7503-1. *Evaluation of Surface Contamination. Part 1: Beta-Emitters (Maximum Beta-Energy Greater than 0.15 Mev) and Alpha-Emitters*. ISO, Geneva, 1988.
- [9] Joint Committee for Guides in Metrology. *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. JCGM, Sèvres, 2010.
- [10] Irving Kaplan. *Nuclear Physics 2nd ed.* Addison-Wesley, Massachusetts, 1964.
- [11] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement 3rd ed.* John Wiley & Sons, New York, 2000.

- [12] Jan Severa and Jaromír Bár. *Handbook of radioactive contamination and decontamination*. Elsevier, New York, 1991.
- [13] *Reglamento de Gestión de Desechos Radiactivos - Acuerdo Gubernativo Número 176-2015*, Guatemala, 2015.