

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



TESIS DOCTORAL

**Determinación de exposición interna por incorporación de
emisores de rayos X y gamma en escenarios de emergencia
nuclear (industria nuclear y medición nuclear)**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Begoña Pérez López

Directora

M^a Antonia López Ponte

Madrid

© Begoña Pérez López, 2019

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



TESIS DOCTORAL

**Determinación de exposición interna por incorporación de
emisores de rayos X y gamma en escenarios de emergencia
nuclear (industria nuclear y medicina nuclear)**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

Begoña Pérez López

Directora

Dra. M^a Antonia López Ponte

Madrid, 2019



U N I V E R S I D A D
COMPLUTENSE
M A D R I D

**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS
PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

D./Dña. Begoña Pérez López,
estudiante en el Programa de Doctorado de Física,
de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de
Madrid, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y
titulada:

DETERMINACIÓN DE EXPOSICIÓN INTERNA POR INCORPORACIÓN DE EMISORES DE RAYOS X Y GAMMA
EN ESCENARIOS DE EMERGENCIA NUCLEAR (INDUSTRIA NUCLEAR Y MEDICINA NUCLEAR)

y dirigida por: M^a Antonia López Ponte

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Madrid, a 10 de julio de 2019

Fdo.:

Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en
la primera página de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor.

A mi familia

Agradezco al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales Y Tecnológicas (CIEMAT) y particularmente a los jefes de unidad de Dosimetría de Radiaciones Ionizantes, D^a Teresa Navarro y Dr. José María Gomez Ros, por permitirme utilizar los medios experimentales para la realización de esta tesis.

La realización de esta tesis no hubiera sido posible sin la colaboración de varias personas, por ello quiero expresar mi especial agradecimiento:

A mi directora de tesis, Dra. M^a Antonia López Ponte, principalmente, por su orientación en la realización de esta tesis y sus ánimos en los momentos más difícil y por todo el esfuerzo que ha dedicado a este trabajo.

A Paco Navarro, mi compañero del laboratorio de Contador de Radiactividad Corporal, por sus consejos técnicos y por sus comentarios de esta memoria.

A Virginia Peyres del Laboratorio de Metrología del CIEMAT, por sus rápidas preparaciones de las fuentes radiactivas, y por sabios consejos.

A Inmaculada Sierra y Carolina Hernandez por colaborar activamente en el llenado de los maniqués.

A David Burgos por sus explicaciones teóricas y consejos.

A mis compañeras del Servicio de Dosimetría Interna: Gloria y Maribel, por su apoyo.

A Talleres del CIEMAT porque allí se han fabricado algunos de los maniqués utilizados.

A Luis Alejo del departamento de Protección Radiológica del Hospital Universitario de la Paz que me facilitaron imágenes de TC.

A mis amigos/as padres y madres de familias del colegio "CEIP Pasamonte" y a mis compañeros/as de CC Físicas que permitieron tomar medidas a sus hijos e hijas.

A mis amigos y amigas, compañeros y compañeras del CIEMAT que a lo largo de esta tesis me han animado y se han interesado por la evolución de esta tesis.

En último lugar, pero el primero en importancia, quiero agradecer a toda mi familia por su apoyo. En especial a mis padres, Onésimo y Justi, que siempre me han animado y han estado a mi lado. A mis hermanos, Carlos, One y Virgi por su apoyo y motivación. A Jesús que ha tenido mucha paciencia, sobre todo en la finalización de esta memoria. A mis hijos por su cariño y su interés en que terminara esta tesis.

A todos y a todas, GRACIAS.

Índice

Índice.....	V
Índice de Figuras.....	IX
Índice de Tablas	XIV
Abreviaturas y acrónimos	XIX
Abstract	XXIII
Resumen.....	XXVII
Introducción	1
1. Capítulo 1: Escenarios de emergencias radiológicas y nucleares. Antecedentes.	7
1.1. Introducción	7
1.2. Accidentes e incidentes nucleares y radiológicos.....	11
1.2.1. Reactores nucleares	13
1.2.2. Medicina nuclear y producción de radiofármacos.....	18
1.2.3. Fabricación del elemento combustible y reprocesado de combustible gastado	19
1.2.4. Armamento nuclear y terrorismo	21
1.2.5. Transporte de material radiactivo	23
1.2.6. Residuos, instalaciones abandonadas y fuentes huérfanas	24
1.3. Medidas que se toman en un accidente nuclear.....	25
2. Capítulo 2: Determinación de la exposición interna en escenarios de emergencia radiológica y nuclear	29
2.1. Introducción. Contaminación en el organismo humano	29
2.2. Las técnicas de medida para la determinación de la exposición interna.....	32
2.3. Materiales para la calibración de los sistemas de detección del CRC del Ciemat	36
2.3.1. Sistema de detección LEGe (Low Energy Germanium detectors)	36
2.3.2. Contador Fastscan.....	38
2.3.3. Software de adquisición y gestión de datos.....	39
2.3.4. Espectrometría gamma (γ)	41
2.3.5. Maniqués de calibración.....	43
2.4. Métodos de calibración	43
2.4.1. Calibración en Energía.....	44
2.4.2. Calibración en resolución o en anchura a media altura, FWHM (Full Width at Half Maximum).....	44
2.4.3. Calibración en eficiencia	45
2.4.4. Validación de la calibración	46
2.5. Límites de detección	47
2.6. Incertidumbres	48
3. Capítulo 3: Medida de ^{131}I en tiroides de población expuesta en situación de emergencia radiológica y nuclear	57
3.1. Introducción	57
3.2. Objetivo.....	59
3.3. Materiales	60
3.3.1. Detectores.....	60
3.3.2. Diseño de patrones de calibración de cuello y tiroides	60
3.3.2.1. <i>Consideraciones en el diseño de patrones de cuello y tiroides</i>	62
3.3.2.2. <i>Maniqués de calibración simuladores de cuellos humanos</i>	63
3.3.2.2.1. <i>Material de los maniqués de cuellos</i>	63
3.3.2.2.2. <i>Dimensiones de cuellos</i>	63
3.3.2.3. <i>Glándula tiroides</i>	65

3.3.2.3.1. <i>Material del tiroides</i>	65
3.3.2.3.2. <i>Dimensiones de la glándula tiroides</i>	65
3.3.2.4. <i>Dimensiones del espesor del cubre-tiroides</i>	66
3.3.2.4.1. <i>Estudio grosor de cuello</i>	66
3.3.2.4.2. <i>Atenuación en el tejido blando del cuello</i>	69
3.3.2.4.3. <i>Espesores de cuellos en los maniqués</i>	70
3.3.2.5. <i>Construcción de maniqués de cuello</i>	71
3.3.3. <i>Maniqués de cuello y tiroides</i>	72
3.3.4. <i>Fuentes de calibración</i>	73
3.4. <i>Método de calibración de ¹³¹I en tiroides</i>	76
3.5. <i>Resultados y discusión</i>	77
3.5.1. <i>Estudio previo de medidas de ¹³¹I en tiroides con el detector LEGe</i>	77
3.5.1.1. <i>Actividades de maniqués de cuello-tiroides de distintas edades medidas con detector LEGe y analizadas con la eficiencia de tiroides de hombre adulto</i>	78
3.5.2. <i>Calibraciones del detector 1 del sistema LEGe</i>	80
3.5.2.1. <i>Calibración en energía y FWHM del detector 1 del sistema LEGe</i>	80
3.5.2.2. <i>Calibración en eficiencia de ¹³¹I en tiroides del detector 1 del sistema LEGe</i> 83	
3.5.2.3. <i>Validación de la calibración en eficiencia de ¹³¹I en tiroides en el detector 1 LEGe</i> 89	
3.5.3. <i>Estudio previo de medidas con el contador Fastscan</i>	93
3.5.3.1. <i>Actividades de maniqués de cuello-tiroides de distintas edades medidas con el contador Fastscan y analizadas con la eficiencia de tiroides de hombre adulto</i> 93	
3.5.4. <i>Calibración del contador Fastscan</i>	94
3.5.4.1. <i>Calibración en energía y FWHM en el contador Fastscan</i>	95
3.5.4.2. <i>Calibración en eficiencia de ¹³¹I en tiroides en el contador Fastscan</i>	96
3.5.4.3. <i>Validación de calibración de ¹³¹I en tiroides en el contador Fastscan</i>	106
3.5.5. <i>Estudios posteriores a la calibración</i>	109
3.5.5.1. <i>Eficiencia en función de la distancia cuello-detector detector 1 LEGe</i>	109
3.5.5.2. <i>Eficiencia en función de la distancia cuello-detector en el Contador Fastscan</i> 111	
3.5.5.3. <i>Eficiencia en función del espesor de cuello en el contador Fastscan</i>	119
3.6. <i>Validación de la metodología de calibración y medida del CRC-CIEMAT y de los maniqués de cuello</i>	120
3.7. <i>Límite de detección (LD) de ¹³¹I en tiroides</i>	123
3.8. <i>Incertidumbres</i>	124
3.9. <i>Conclusiones de medida de ¹³¹I en tiroides</i>	125

4. Capítulo 4: Medida de emisores gamma en cuerpo entero del público expuesto en emergencia radiológica y nuclear	129
4.1. <i>Introducción</i>	129
4.2. <i>Objetivo</i>	131
4.3. <i>Materiales</i>	131
4.3.1. <i>Detectores</i>	131
4.3.2. <i>Patrones de calibración de cuerpo entero</i>	132
4.3.3. <i>Soportes de maniqués</i>	137
4.4. <i>Método de calibración de medida de emisores gamma en cuerpo entero</i>	137
4.5. <i>Resultados y discusión</i>	138
4.5.1. <i>Calibraciones para determinar emisores gamma distribuidos en cuerpo entero en el sistema LEGe</i>	138
4.5.1.1. <i>Calibración en energía y resolución de anchura del pico (FWHM) del sistema LEGe</i>	138
4.5.1.2. <i>Calibración en eficiencia para emisores gamma en cuerpo entero en el sistema LEGe</i>	140
4.5.1.3. <i>Validación de la calibración cuerpo entero en el sistema LEGe</i>	146

4.5.2.	Estudio previo de medidas de cuerpo entero en el contador Fastscan.....	148
4.5.3.	Calibraciones del contador Fastscan.....	150
4.5.3.1.	<i>Calibración en energía y resolución del contador Fastscan.....</i>	151
4.5.3.2.	<i>Calibración en eficiencia de emisores gamma en cuerpo entero en el contador Fastscan</i>	153
4.5.3.3.	<i>Validación de la calibración de cuerpo entero en Fastscan.....</i>	158
4.6.	Eficiencias para emisores gamma utilizados en medicina nuclear	164
4.7.	Límite de detección de emisores gamma en cuerpo entero.....	165
4.8.	Incertidumbres	166
4.9.	Conclusiones de medida de emisores gamma en cuerpo entero	167
5.	Capítulo 5: Medida de plutonio en pulmón en emergencia radiológica y nuclear ..	169
5.1.	Introducción	169
5.2.	Objetivo.....	170
5.3.	Materiales	170
5.3.1.	Detectores.....	170
5.3.2.	Patrones de calibración de ^{239}Pu en pulmón	170
5.4.	Método de calibración de ^{239}Pu en pulmón.....	171
5.5.	Resultados y discusión.....	172
5.5.1.	Calibraciones para determinar ^{239}Pu en pulmón.....	172
5.5.1.1.	<i>Calibración en energía y resolución de anchura del pico (FWHM) del sistema LEGe</i>	172
5.5.1.2.	<i>Calibración en eficiencia de ^{239}Pu en pulmón de hombre</i>	175
5.5.1.3.	<i>Validación de calibración en la determinación de ^{239}Pu en pulmón de hombre</i>	179
5.6.	Límite de Detección (LD) de ^{239}Pu en pulmón	181
5.7.	Incertidumbres	182
5.8.	Conclusiones de medida de plutonio en pulmón	182
6.	Capítulo 6: Medida de americio en hueso en miembros del público en emergencia radiológica y nuclear	185
6.1.	Introducción	185
6.2.	Objetivo.....	186
6.3.	Materiales	187
6.3.1.	Detectores.....	187
6.3.2.	Patrones de calibración ^{241}Am en hueso	187
6.4.	Método de calibración de ^{241}Am en hueso.....	189
6.5.	Resultados y discusión.....	189
6.5.1.	Estudio previo de geometría de cráneo contaminado de ^{241}Am	189
6.5.1.1.	<i>Cráneo de hombre</i>	190
6.5.1.2.	<i>Niño de 2 años.....</i>	192
6.5.2.	Calibraciones para determinar ^{241}Am en cráneo.....	194
6.5.2.1.	<i>Calibración en energía y anchura del pico (FWHM) del sistema LEGe ...</i>	194
6.5.2.2.	<i>Calibración en eficiencia de ^{241}Am en cráneo de hombre adulto</i>	194
6.5.2.3.	<i>Validación de calibraciones en la determinación de ^{241}Am en cráneo de hombre</i>	196
6.5.2.4.	<i>Calibración en eficiencia de ^{241}Am en cráneo de niño de 2 años.....</i>	197
6.5.2.5.	<i>Validación de calibración de ^{241}Am en cráneo de niño de 2 años.....</i>	198
6.5.3.	Determinación de actividad en esqueleto	198
6.6.	Límite de detección de ^{241}Am en cráneo	199
6.7.	Intercomparación de Cráneos organizada por EURADOS	199
6.8.	Incertidumbres	204
6.9.	Conclusiones de medida de americio en hueso	205
7.	Capítulo 7: Medida de emisores gamma en heridas en emergencia radiológica y nuclear.....	207
7.1.	Introducción	207

7.2.	Objetivo.....	207
7.3.	Materiales	208
7.3.1.	Detectores.....	208
7.3.2.	Patrones de calibración de heridas	208
7.4.	Método de calibración de heridas.....	209
7.5.	Resultados y discusión.....	210
7.5.1.	Calibraciones para determinar emisores gamma en heridas en el detector 1 del sistema LGe.....	210
7.5.1.1.	<i>Calibración en energía y resolución de anchura del pico (FWHM) del sistema LGe</i>	210
7.5.1.2.	<i>Calibración en eficiencia de heridas LGe.....</i>	211
7.5.1.3.	<i>Validación de calibración en la determinación de heridas en el detector 1 LGe 215</i>	
7.5.2.	Estudio de la eficiencia en función de la profundidad	217
7.6.	Límite de detección de heridas.....	218
7.7.	Incertidumbres	219
7.8.	Conclusiones de medida de emisores gamma en heridas.....	219
	Conclusiones generales	221
	Líneas Futuras de Investigación	224
	Publicaciones, proyectos y presentaciones relacionados con esta tesis	225
	Referencias bibliográficas.....	228
	Anexo: Llenado de maniqués de cuerpo entero BOMAB HE2 y HE4	233

Índice de Figuras

Figura 1.1: Descripción de la escala Internacional de sucesos nucleares y radiológicos (INES).....	12
Figura 1.2: Esquema de una central nuclear. Fuente: Unesa.....	13
Figura 2.1: Esquema del modelo inhalación de ICRP 66. Distingue la zona extratorácica y torácica.....	30
Figura 2.2: Modelo del tracto alimentario humano según publicación ICRP 100.....	31
Figura 2.3: Esquema del modelo biocinético de material radiactivo depositado en heridas de NCRP 156.....	32
Figura 2.4: Detectores de germanio LEGe y cámara blindada que los alberga en el Laboratorio de Radiactividad Corporal del CIEMAT.....	37
Figura 2.5: Sistema de detección Fastscan, formado por dos detectores NaI(Tl) colocados en columna del CRC del CIEMAT.....	39
Figura 2.6: Ventana del software Genie 2000 utilizado para la adquisición y análisis de las mediciones.....	40
Figura 2.7: Fotopico pico de un espectro gamma delimitado por una ROI y en cuyo interior se representa el número de cuentas (proporcionales a la actividad) en función de la energía representado por el centroide.....	42
Figura 2.8: Descomposición de un fotopico en canales para calcular el LD.....	48
Figura 2.9: Picos de fondo tipo lineal y escalón (step) que pueden ser utilizados en la resta del fondo ambiental.....	50
Figura 3.1: Modelo biocinético ICRP 78 para el metabolismo del yodo.....	58
Figura 3.2: Maniquí de cuello y tiroides de adulto tipo ANSI.....	60
Figura 3.3: Maniquí de cuello RSD.....	61
Figura 3.4: Resultados de la exactitud (Br) de ^{133}Ba y ^{137}Cs de la intercomparación de tiroides de IRSN en el año 2014. Fuente: IRSN.....	62
Figura 3.5: Croquis del maniquí simulador de cuello y tiroides, donde se introduce el vial.....	62
Figura 3.6: Representación del perímetro de cuello para diferentes edades.....	64
Figura 3.7: Imagen de TC axial de cuello a la altura del tiroides de niño de 5 años visto con IQview.....	66
Figura 3.8: Imagen TC: corte axial del cuello a la altura del tiroides, se ven los diferentes tejidos. http://image.slidesharecdn.com/viscerasdelcuello2-110114222703-phpapp01/95/visceras-del-cuello2-4-1024.jpg?cb=1295065697	67
Figura 3.9: Relación de los grosores de los tejidos adiposo y muscular en el cuello en función de la edad.....	68
Figura 3.10: Patrones de metacrilato simuladores de cuellos, de izquierda a derecha, adulto, niños de 15, 10, 5 y 1 año, fabricados en CIEMAT durante el desarrollo de esta tesis doctoral. En el interior el vial simulador del tiroides.....	73
Figura 3.11: Viales simuladores de la contaminación del tiroides con ^{131}I (de izquierda a derecha) para hombre y mujer adultos, 15, 10, 5 y 1 año.....	75
Figura 3.12: Maniqués de cuello de metacrilato delante están sus respectivos viales de izquierda a derecha simulan a hombre y mujer adultos, 15, 10, 5 y 1 año, fueron los utilizados en la calibración y en la validación.....	77
Figura 3.13: Comparativa de actividades y exactitudes de medidas realizadas a los patrones de cuello y analizadas con la eficiencia de hombre en el detector 1 del sistema LEGe.....	80
Figura 3.14: Geometría de calibración de energía del sistema LEGe.....	81

Figura 3.15: Espectro utilizado en la calibración en energía y FWHM, con fuentes de ^{241}Am y ^{152}Eu sistema LEGe.	82
Figura 3.16: Calibración en energía y FWHM para el detector 1 del sistema LEGe en el rango de energías de 10-1000 keV.	82
Figura 3.17: Geometría y posicionamiento del patrón de cuello de hombre para la calibración de ^{131}I en tiroides del detector 1 LEGe.	84
Figura 3.18: Espectro de calibración del det 1 LEGe con ^{133}Ba y ^{137}Cs en tiroides para hombre adulto.	85
Figura 3.19: Curva de calibración en eficiencia y picos utilizados para el tiroides de hombre en el detector 1 LEGe.	85
Figura 3.20: Espectro de calibración de ^{131}I en tiroides para hombre con geometría de cubito supino.	86
Figura 3.21: Curvas de eficiencia de ^{131}I en tiroides para las diferentes configuraciones en el detector 1 LEGe.	88
Figura 3.22: Comparativa de las curvas de calibración en eficiencias de ^{131}I en el rango energético del detector 1 del sistema LEGe.	88
Figura 3.23: Evolución de la eficiencia en la emisión de 364 keV en función del volumen del tiroides.	89
Figura 3.24: Comparación de las actividades medidas y de referencia, y exactitud para las medidas realizadas de las diferentes configuraciones con el detector 1 LEGe.	90
Figura 3.25: Actividades medidas y de referencia de los viales y exactitud para los patrones de cuello de ^{133}Ba y ^{137}Cs medidos en el detector 1 del sistema LEGe.	93
Figura 3.26: Actividades medidas, de referencia y exactitudes (Bri) de la familia de patrones de cuello en la geometría de medida en tiroides de hombre adulto y análisis con la eficiencia de hombre adulto.	94
Figura 3.27: Esquema de la calibración de tiroides.	95
Figura 3.28: Espectro de calibración de E y FWHM del detector superior del Fastscan. ...	96
Figura 3.29: Curvas de calibración de Energía y FWHM de los detectores superior e inferior del Fastscan.	96
Figura 3.30: Geometría de medida de Tiroides en Fastscan.	97
Figura 3.31: Espectro de ^{133}Ba y ^{137}Cs en un vial simulador de tiroides en el cuello de hombre medido en el contador Fastscan.	98
Figura 3.32: Curva de eficiencia y picos del espectro utilizados para la calibración geometría de ^{131}I en tiroides de hombre.	98
Figura 3.33: Posición relativa de los patrones simuladores de tiroides, dependiendo de la edad, respecto a los detectores superior e inferior del contador Fastscan.	100
Figura 3.34: Factor de calibración de eficiencia de detección para la emisión de 364 keV para las familias de patrones dependiendo de la edad en el contador Fastscan.	101
Figura 3.35: Espectro de ^{131}I en tiroides con un detector NaI(Tl) del contador Fastscan.	101
Figura 3.36: Curva de calibración de tiroides de mujer y los picos utilizados en el contador Fastscan.	102
Figura 3.37: Curva de calibración de tiroides de niño de 1 año y los picos utilizados en el contador Fastscan.	103
Figura 3.38: Curva de calibración de tiroides de niño de 5 años y los picos utilizados en el contador Fastscan.	103
Figura 3.39: Curva de calibración de tiroides de niño de 10 años y los picos utilizados.	104
Figura 3.40: Curva de calibración de tiroides de niña de 15 años y los picos utilizados.	104

Figura 3.41: Curva de calibración de tiroides de niño de 15 años y los picos utilizados .	105
Figura 3.42: Calibraciones en eficiencia en contador Fastscan para todas las configuraciones, con una distancia de 12 cm cuello detector.	105
Figura 3.43: Eficiencia de los patrones para una E_{γ} de 364 keV. Las medidas fueron realizadas a la altura que indica la Tabla 3.26 (ver Figura 3.33) y con una distancia detector cuello de 12 cm.	106
Figura 3.44: Comparativa de actividades de los mismos patrones de cuello medidos con igual geometría que la de calibración y su exactitud, en el contador Fastscan.	107
Figura 3.45: Resultado de la exactitud de simuladores de ^{133}Ba y ^{137}Cs de los diferentes patrones en las medidas de validación de la calibración en Fastscan.	109
Figura 3.46: Comparativa de factores de calibración de eficiencia del detector 1 LEGE con la geometría de ^{131}I en tiroides con distancias cuello-detector de 12 y 15 cm en la emisión de 364 keV.	110
Figura 3.47: Curvas de eficiencia de cuello para las configuraciones de 1, 5, 10, 15 años para 18 cm de distancia al detector del contador Fastscan.	113
Figura 3.48: Eficiencia de Fastscan para los patrones de cuello de diferentes edades con varias distancias al detector.	115
Figura 3.49: Eficiencia de los diferentes patrones de cuello para la emisión principal de ^{131}I en función de la distancia.	115
Figura 3.50: Exactitud de las medidas analizadas con los factores de eficiencia correspondientes a diferentes distancias.	119
Figura 3.51: Factor de eficiencia en detector superior del contador Fastscan, dependiendo del espesor de cuello.	120
Figura 3.52: Maniquí de cuello de adulto, 5 y 10 años del SKC-CEN.	121
Figura 3.53: Esquema del maniquí de cuello SCK-CEN que muestra los tres pares de agujeros para las configuraciones de 5 y 10 años y adulto y sus dimensiones. Fuente: SCK-CEN.	121
Figura 3.54: Viales de tiroides de 5, 10 años y adulto, del SKC-CEN.	122
Figura 4.1: Detectores LEGe y cadena electrónica que los soporta, el amplificador en la posición 5, que permite detectar en el rango de energía de 10-2000 keV.	132
Figura 4.2: BOTTle Mannikin Absorber phantom (BOMAB) en la configuración de hombre adulto y detalle de una pieza.	133
Figura 4.3: Maniquí BOMAB HE4 de calibración de hombre y su espectro en el sistema LEGe.	139
Figura 4.4: Calibración en energía y resolución del pico con la anchura de pico a mitad de altura (FWHM) para el rango energético de 10 keV a 2000 keV del sistema LEGe.	140
Figura 4.5: Geometrías de las configuraciones de maniquí BOMAB para los organismos de 1, 5, 10 15 años y adultos a partir de las piezas del maniquí BOMAB de hombre en el sistema LEGe.	142
Figura 4.6: Curvas de calibración de eficiencia de cuerpo entero para las diferentes configuraciones en el sistema LEGe.	145
Figura 4.7: Eficiencias de cuerpo entero en el rango energético 10-2000 keV en el sistema LEGe.	146
Figura 4.8: Comparación de actividades medidas, actividades de referencia y exactitud del maniquí BOMAB HE2, simulador de la contaminación interna distribuida en todo el organismo, realizadas con el sistema LE Ge.	148
Figura 4.9: Configuración de las piezas utilizadas en cada calibración del contador Fastscan.	149

Figura 4.10.- Certificado de calibración de las fuentes puntuales en el editor del software Genie 2000.....	151
Figura 4.11: Espectro de calibración de fuentes puntuales.....	152
Figura 4.12: Calibraciones en energía y resolución (FWHM) de las diferentes señales del contador Fastscan.....	153
Figura 4.13: Espectros de los maniqués BOMAB HE2 y HE4 utilizados en la calibración.....	155
Figura 4.14: Curvas de calibración en eficiencia y picos utilizados para las diferentes configuraciones en el contador Fastscan.....	157
Figura 4.15: Curvas de las calibraciones en eficiencia de las diferentes configuraciones en geometría de todo el organismo en el contador Fastscan.....	158
Figura 4.16: Exactitud de las medidas de validación en geometría de todo el organismo en el contador Fastscan.....	163
Figura 5.1: Maniquí de torso LLNL de hombre adulto.....	171
Figura 5.2: Geometría de calibración en Energía y FWHM.....	172
Figura 5.3: Espectro de calibración en Energía con isotopos de ^{241}Am y ^{152}Eu	173
Figura 5.4: Representación de la calibración en energía para el grupo de detectores All Summed.....	174
Figura 5.5: Representación de la calibración FWHM en función de la energía del sistema LEGe.....	174
Figura 5.6: Espectro de ^{239}Pu	176
Figura 5.7: Eficiencia en función del espesor torácico para las diferentes emisiones energéticas de ^{239}Pu y su comparación.....	178
Figura 5.8: El logaritmo neperiano de las eficiencias en función del logaritmo neperiano de la energía.....	179
Figura 5.9: Maniquí de torso del IRSN. https://wbc.llnl.gov/content/assets/images/torso.jpg	180
Figura 6.1: Detectores LEGe y cadena electrónica asociada, con el amplificador en la posición 10, que permite detectar en el rango de energía de 10-1000 keV.....	187
Figura 6.2: Huesos de cráneo humano.....	187
Figura 6.3: Maniquí de cráneo de hombre adulto CIEMAT-Cohen.....	188
Figura 6.4: Maniquí de cráneo de niño de 2 años BfS.....	189
Figura 6.5: Geometrías de cráneo CIEMAT- Cohen consideradas en el estudio de eficiencias.....	190
Figura 6.6: Geometrías de medida del cráneo CIEMAT-Cohen con el detector 1 del sistema LEGe.....	191
Figura 6.7: Espectro de ^{241}Am en cráneo CIEMAT-Cohen.....	191
Figura 6.8: Geometrías de cráneo BfS consideradas en el estudio de eficiencias.....	192
Figura 6.9: Geometrías de medida del cráneo BFS con el detector 1 del sistema LEGe.....	193
Figura 6.10: Geometría de calibración en la vertical del cráneo de hombre con maniquí CIEMAT-Cohen.....	194
Figura 6.11: Geometría de calibración de frente del cráneo de hombre adulto, con maniquí CIEMAT- Cohen.....	195
Figura 6.12: Geometría de calibración de niño de 2 años.....	197
Figura 6.13: Maniqués de cráneo de izquierda a derecha USTUR, SURO y BFS.....	200
Figura 6.14: Esquema de las posiciones de eficiencia medidas en el maniquí USTUR, en el lateral donde se encuentra el hueso humano con contaminación real de ^{241}Am	200
Figura 6.15: Medida del maniquí SURO con el detector 1 del sistema LEGe.....	201

Figura 6.16: Estudio de los factores de eficiencia de las diferentes posiciones del maniquí USTUR	202
Figura 6.17: Variación de los factores de eficiencia en las diferentes posiciones de los detectores-cráneos	202
Figura 6.18: Geometría de medida de los tres maniquíes, utilizando los 4 detectores ...	203
Figura 7.1: Maniquí de heridas del IRSN fabricado con láminas de goma EVA. Fuente: IRSN	208
Figura 7.2: Calibración en energía y resolución del detector 1 LEGe.....	211
Figura 7.3: Calibración del detector 1 LEGe para medir emisores gamma en heridas. ...	211
Figura 7.4: Espectro de emisores gamma heridas de ^{241}Am , ^{57}Co y ^{137}Cs con detector 1 LEGe	212
Figura 7.5: Espectro de emisores gamma heridas de ^{133}Ba y ^{85}Sr con detector 1 LEGe	212
Figura 7.6: Calibración en eficiencia de heridas con contaminación en la superficie con detector 1 LEGe.....	213
Figura 7.7: Calibración en eficiencia de heridas con contaminación en profundidad 1 cm con detector 1 LEGe.....	213
Figura 7.8: Calibración en eficiencia de heridas con contaminación en profundidad de 1.8 cm, detector LEGe	214
Figura 7.9: Eficiencia en función de la profundidad donde se encuentra la contaminación para las diferentes emisiones energéticas de la fuente y su comparación	214
Figura 7.10: Actividades y exactitud de la validación de calibración de heridas en el detector 1 LEGe.....	217
Figura 7.11: Eficiencia en función de la profundidad para diferentes energía	218
Figura 7.12: Medida blanco de herida en el detector 1 del sistema LEGe.....	218

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Límites de dosis recomendados por la ICRP 103[4] en situaciones de exposición planificada ¹	11
Tabla 1.2: Comparaciones de las estimaciones de una amplia gama de actividades (PBq) de radionucleidos liberados a la atmósfera en los accidentes de Fukushima y Chernobyl[19].	16
Tabla 1.3: Actividades medidas de extranjeros afectados por el accidente de Fukushima en contadores de radiactividad corporal europeos.....	17
Tabla 1.4: Radionucleidos más comunes utilizados en medicina nuclear. Fuente ISO 16637[26].....	19
Tabla 2.1: Composiciones isotópicas de uranio natural, uranio empobrecido y Uranio enriquecido, obtenido de la norma ISO 16638-1: “Radiological protection- Monitoring and internal dosimetry for specific material- Part 1: Uranium”	35
Tabla 2.2: Valores típicos para los componentes de la incertidumbre tipo B lognormal en mediciones <i>in vivo</i> con emisiones energéticas bajas, medias y altas, dados por la norma ISO 27048	55
Tabla 2.3: Valores típicos de las incertidumbres tipo A y B para medidas <i>in vivo</i> de los radionucleidos emisores en bajas, medias y altas energías de radiación. Fuente ISO 27048	55
Tabla 3.1: Comparación del coeficiente de atenuación y densidad del tejido blando con el metacrilato para la energía de 364 keV, emisión principal del ¹³¹ I.....	63
Tabla 3.2: Valores de perímetro de cuello para diferentes edades.....	64
Tabla 3.3: Dimensiones de cuello calculadas para la diseñar el cuello simulador de metacrilato para los niños con edades de 1, 5, 10, y 15 años.	65
Tabla 3.4: Volúmenes del tiroides según las recomendaciones de la publicación ICRP 89.	65
Tabla 3.5: Materiales y dimensiones de los recipientes que simulan el tiroides en las diferentes edades.	66
Tabla 3.6: Resultados de las medidas de los espesores de los diferentes tejidos de las imágenes de TC.	68
Tabla 3.7: Espesores de los diferentes tejidos en el cuello para diferentes edades.	69
Tabla 3.8: Cálculo del coeficiente de atenuación para la energía de 364 keV.....	70
Tabla 3.9: Valores de la atenuación para el espesor de tejido blando del cuello.....	70
Tabla 3.10: Cálculo del grosor de cuello de metacrilato teniendo en cuenta el grosor del vial.	71
Tabla 3.11: Espesores equivalentes de cuello de tejido blando y con metacrilato-vial.	71
Tabla 3.12: Dimensiones de los maniqués de cuello fabricados para y utilizados en el laboratorio del CRC-Ciemat, para las diferentes configuraciones (adulto, niños de 15, 10, 5 y 1 año).....	72
Tabla 3.13: Emisiones X y γ e intensidades de emisión de los radionucleidos ¹³¹ I, ¹³³ Ba y ¹³⁷ Cs, están señalados los más utilizados. Obtenidos de http://nucleardata.nuclear.lu.se	74
Tabla 3.14: Volúmenes (V) de la fuente de ¹³¹ I utilizadas para las edades de 1, 5, 10, 15 años, mujer y hombre adulto.....	75
Tabla 3.15: Actividades (A) de las fuentes con ¹³¹ I introducidas en cada uno de los viales de volumen V.....	75
Tabla 3.16: Actividades de los viales de ¹³³ Ba y ¹³⁷ Cs, simuladores de las emisiones de ¹³¹ I en tiroides, utilizados para validar las calibraciones.	76

Tabla 3.17: Medidas realizadas con los maniqués en el detector 1 del sistema LEGe, analizadas con la calibración de hombre estándar para la energía de 364 keV, Exactitu y precisión de las actividades medidas de niños, mujer y hombre analizados con eficiencia de calibración de hombre en el detector 1 LEGe.	79
Tabla 3.18: Período de desintegración, energía e intensidades de las emisiones X y γ del ^{241}Am y ^{152}Eu	81
Tabla 3.19: Comparación de las principales energías e intensidades de emisión de ^{131}I , con las del ^{133}Ba y ^{137}Cs . http://nucleardata.nuclear.lu.se	83
Tabla 3.20: Certificado de fuentes utilizadas en las calibraciones del sistema LEGe.	84
Tabla 3.21: Eficiencia de ^{131}I en tiroides en la emisión de 364 keV para los diferentes volúmenes de tiroides.	89
Tabla 3.22: Resultados de actividad de ^{131}I para las diferentes configuraciones, obtenidos con cada eficiencia dependiendo de la edad	90
Tabla 3.23: Resultados de las actividades de los simuladores de ^{133}Ba y ^{137}Cs obtenidos con cada eficiencia dependiendo de la edad.	92
Tabla 3.24: Medidas de los patrones en el detector superior del contador Fastscan analizado con la eficiencia de hombre adulto.	94
Tabla 3.25: Vida media y emisiones del ^{57}Co , ^{137}Cs y ^{60}Co	95
Tabla 3.26: Alturas estimadas de tiroides de las diferentes configuraciones para medir el ^{131}I en el contador Fastscan.	99
Tabla 3.27: Factor de calibración de los dos detectores del contador Fastscan para la medida de ^{131}I en la familia de cuellos simuladores de tiroides de distintas edades a una distancia de cuello-detector de 12 cm.	100
Tabla 3.28: Espectro y fichero de cada una de las calibraciones obtenidas así como los detectores utilizados en la calibración del contador Fastscan para medida de yodo en tiroides en individuos de varias edades	102
Tabla 3.29: Eficiencia para los patrones de cuello en 364 keV del equipo Fastscan.	106
Tabla 3.30: Medidas de la familia de patrones de cuello a una distancia con el detector de 12 cm, analizadas con la eficiencia de calibración correspondiente al tiroides de cada grupo de edad.	107
Tabla 3.31: Resultados de las medidas realizadas con los simuladores de ^{133}Ba y ^{137}Cs en Fastscan.	108
Tabla 3.32: Factores de calibración de la eficiencia e incertidumbres de ^{131}I en tiroides para la emisión principal, 364 keV, con el detector 1 de LEGe, la distancia patrón - detector es 12 cm.	110
Tabla 3.33: Calculo de eficiencias para los dos detectores del contador Fastscan a una distancia de 18 cm.	111
Tabla 3.34: Calculo de eficiencias para los dos detectores del contador Fastscan a una distancia de 24 cm.	111
Tabla 3.35: Medidas de actividad de cuello a diferentes distancias con el detector y analizado con la eficiencia de 12 cm.	117
Tabla 3.36: Medidas de actividad de cuello a diferentes distancias con el detector y analizado con la eficiencia de 18 cm.	117
Tabla 3.37: Medidas de actividad de cuello a diferentes distancias con el detector y analizado con la eficiencia de 24 cm.	118
Tabla 3.38: Factor de eficiencia en la emisión principal de ^{131}I , 364 keV, de los patrones de cuellos con geometría de pie de hombre a la altura del tiroides de 157 cm y 12 cm de distancia con el detector superior del contador Fastscan.	120

Tabla 3.39: Actividad de las fuentes con una incertidumbre ($k=1$) del 3 %, con fecha 1 de enero de 2016.....	122
Tabla 3.40: Medidas realizadas en el detector LEGe de los patrones del SCK-CEN simuladores de la contaminación de tiroides por ^{131}I , utilizados en la intercomparación del proyecto CATHYMARA.....	122
Tabla 3.41: Medidas realizadas en el contador Fastscan de los patrones utilizados en la intercomparación del proyecto CATHYMARA.....	123
Tabla 3.42: Límites de detección de ^{131}I en tiroides para las diferentes configuraciones en el detector 1 del sistema LEGe.	123
Tabla 3.43: Límites de detección de ^{131}I en tiroides para diferentes configuraciones del contador Fastscan, y en diferentes distancias cuello-detector.	124
Tabla 4.1: Productos de fisión más representativos que se producen en un reactor. http://www.nucleide.org	129
Tabla 4.2: Principales productos de activación sólidos. http://www.nucleide.org	130
Tabla 4.3: Dimensiones del maniquí BOMAB según las especificaciones de la norma ANSI 13.35 y del BOMAB HE4 del laboratorio del CRC del CIEMAT.....	133
Tabla 4.4: Recomendaciones de altura y peso para las diferentes configuraciones de la ICRP 89 y los conseguidos con diferentes piezas del maniquí BOMAB.....	133
Tabla 4.5: Radionucleidos y principales emisiones gamma del maniquí BOMAB HE2. http://nucleardata.nuclear.lu.se/	134
Tabla 4.6: Radionucleidos y principales emisiones gamma del maniquí BOMAB HE4. http://nucleardata.nuclear.lu.se/	134
Tabla 4.7: Actividades de los radionucleidos en las diferentes piezas de maniquí BOMAB HE2 en la fecha origen 17/7/2014.....	135
Tabla 4.8: Actividades de los radionucleidos en las diferentes piezas de maniquí BOMAB HE4 en la fecha de medida 17/11/2016, corregidas por decaimiento radiactivo.....	135
Tabla 4.9: Actividades de las diferentes configuraciones del maniquí BOMAB HE2 en 17/7/2014.....	136
Tabla 4.10: Actividades de las diferentes configuraciones del maniquí BOMAB HE4 en 17/11/2016.....	136
Tabla 4.11: Certificado de las fuentes radiactivas del maniquí BOMAB HE4 utilizados en calibraciones de cuerpo entero en el sistema LEGe.	141
Tabla 4.12: Resultados de actividad del maniquí BOMAB HE2 de cuerpo entero para las diferentes configuraciones dependiendo de la edad, analizados con la eficiencia correspondiente del sistema LEGe.	147
Tabla 4.13: Desviaciones de la familia de patrones de todo el organismo analizadas con la calibración de hombre adulto.	150
Tabla 4.14: Emisiones de las fuentes puntuales utilizadas en la calibración en energía del Fastscan.....	151
Tabla 4.15: Certificados de las fuentes utilizadas en la calibración, maniquíes BOMAB HE2 Y HE4	154
Tabla 4.16: Alturas de los alzadores para algunas configuraciones.	155
Tabla 4.17: Referencia de los espectros utilizados en cada calibración.....	155
Tabla 4.18: Librería BOMAB_HE4_2016.NLB se muestran los radionucleidos del BOMAB HE4, su vida medida y emisiones principales.	159
Tabla 4.19: Medidas de validación de la calibración de 1 año, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218	160

Tabla 4.20: Medidas de validación de la calibración de 5 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218	160
Tabla 4.21: Medidas de validación de la calibración de 10 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218	160
Tabla 4.22: Medidas de validación de la calibración de mujer de 15 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218	161
Tabla 4.23: Medidas de validación de la calibración de hombre de 15 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218	161
Tabla 4.24: Medidas de validación de la calibración de mujer, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218	162
Tabla 4.25: Medidas de validación de la calibración de hombre, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218	162
Tabla 4.26: Eficiencias de algunos radionucleidos utilizados en medicina nuclear en sus emisiones principales e intensidades de emisión para las diferentes configuraciones de cuerpo entero en el sistema de detección LGe.	164
Tabla 4.27: Eficiencias de algunos radionucleidos utilizados en medicina nuclear en sus emisiones principales para las diferentes configuraciones de cuerpo entero en el contador Fastscan.	165
Tabla 4.28: Límites de detección de algunos emisores gamma en cuerpo entero de las diferentes configuraciones en el sistema LGe.	166
Tabla 4.29: Límites de detección de algunos emisores gamma en cuerpo entero de las diferentes configuraciones en el contador Fastscan.	166
Tabla 5.1: Energía e intensidades de emisión RX de ^{239}Pu [99].....	169
Tabla 5.2: Capas torácicas y su espesor torácico del maniquí LLNL	172
Tabla 5.3: Librería de análisis de las fuentes puntuales.....	173
Tabla 5.4: Certificado de calibración de fuentes puntuales	173
Tabla 5.5: Relación de canal- energía para cada uno de los detectores	174
Tabla 5.6: Ecuaciones de calibración en energías y FWHM	174
Tabla 5.7: Validación de la calibración en energías y anchuras con los pulmones de ^{241}Am y ^{152}Eu	175
Tabla 5.8: Medidas y cálculos de los factores de eficiencia de pulmón ^{239}Pu en la energía de 17.2 keV para las diferentes capa torácicas.....	176
Tabla 5.9: Medidas y cálculos de los factores de eficiencia de pulmón ^{239}Pu en la energía de 20.2 keV para las diferentes capa torácicas.....	177
Tabla 5.10: Medidas y cálculos de los factores de eficiencia de pulmón ^{239}Pu en la energía de 51.6 keV para las diferentes capa torácicas.....	177
Tabla 5.11: Valores de las eficiencias y sus incertidumbres para los diferentes espesores torácicos en las emisiones de RX del ^{239}Pu	177
Tabla 5.12: Eficiencias para los espesores torácicos de 1.8 y 2.8 cm en las emisiones energéticas de 17.2 y 51.6 keV.....	180
Tabla 5.13: Medidas de Validación de la calibración de ^{239}Pu para la energía de RX 17,2 keV en pulmón de hombre en el sistema LGe.	180
Tabla 5.14: Medidas de validación de la calibración de ^{239}Pu para la energía de RX 20,2 keV en pulmón de hombre en el sistema LGe.	181
Tabla 5.15: Medidas de validación de la calibración de ^{239}Pu para la energía de emisión γ 51.6 keV en pulmón de hombre en el sistema LGe.	181
Tabla 5.16: Límites de detección de ^{239}Pu en pulmón con tiempo de medida 1h.	182
Tabla 5.17: Límites de detección de ^{239}Pu en pulmón con tiempo de medida 3h.	182

Tabla 6.1: Energía e intensidades de emisión gamma de ²⁴¹ Am. http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/	185
Tabla 6.2: Eficiencias calculadas para las diferentes posiciones estudiadas para realizar la calibración.....	192
Tabla 6.3: Factores de eficiencia de ²⁴¹ Am en el cráneo BFS medido con el detector 1 del sistema LEGe	193
Tabla 6.4: Factores de eficiencia en 59.5 keV en cráneo en geometría envolvente en la posición vertical, sobre el parietal y frontal del cráneo	195
Tabla 6.5: Resultados de eficiencia para calibración en cráneo en geometría detectores a 2 cm en el frontal	195
Tabla 6.6: Validación de la calibración de ²⁴¹ Am en cráneo de hombre en la posición vertical	196
Tabla 6.7: Validación de calibración ²⁴¹ Am en cráneo de hombre en la posición del frontal	196
Tabla 6.8: Calculo de eficiencia para la emisión de 59.5 keV en una geometría de niño de 2 años.....	197
Tabla 6.9: Medidas de validación de calibración de niño de 2 años.	198
Tabla 6.10: Factor de eficiencia del detector 1 del sistema LEGe con el casquete SURO	201
Tabla 6.11: Factores de eficiencia del detector 1 del sistema LEGe con el maniquí USTUR	201
Tabla 6.12: Resultados de la actividad de los diferentes cráneos de la intercomparación calculados con la eficiencia de hombre adulto	203
Tabla 6.13: Resultados de la actividad de los diferentes cráneos de la intercomparación calculados con la eficiencia de niño de 2 años	204
Tabla 6.14: Valores sugeridos de las incertidumbres, tipo B para la evaluación de la actividad de ²⁴¹ Am en cráneo. IDEAS Guidelines[66].....	204
Tabla 7.1: Actividad de radionucleidos de maniqués utilizados en calibración de heridas	209
Tabla 7.2: Emisiones energéticas e intensidades de emisión de las fuentes radiactivas utilizadas en la calibración de heridas.....	209
Tabla 7.3: Actividades de las fuentes utilizadas en la validación de la calibración en la fecha 6/1/2017	215
Tabla 7.4: Validación de la calibración en la superficie de la herida detector 1 LEGe	215
Tabla 7.5: Validación de la calibración en la 1 cm de profundidad de la herida detector 1 LEGe	216
Tabla 7.6: Validación de la calibración en la 1.8 cm de profundidad de la herida detector 1 LEGe	216
Tabla 7.7: Límites de detección de emisores γ en heridas para un tiempo de medida de 10 min con el detector 1 del sistema LEGe.....	218

Abreviaturas y acrónimos

ACTII	Criostato para detectores de actínidos de Germanio
ADC	Convertidor Analógico Digital
AM	Analizador Multicanal
AMAD	Diámetro Aerodinámico de la Mediana de Actividad
ANSI	Instituto Nacional de Normas Americano
ATI	Almacén Temporal Individualizado
BfS	Oficina Federal de Protección Radiológica de Alemania
BOMAB	Maniquí de botella absorbente (Bottle Mannequin Absorber Phantom)
CATHyMARA	Proyecto de monitorización de tiroides de niños y adultos después de un accidente en un reactor
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CIS	Coloides y Estado Intermedio
BRMD	Oficina de Radiación y Dispositivos Médicos de Canada
CRC	Contador de Radiactividad Corporal
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
D	Dosis absorbida
$D_{T,R}$	Dosis absorbida por un órgano o tejido con una radiación R
E	Energía
$E(\tau)$	Dosis efectiva comprometida
$e(\tau)$	Coefficiente de dosis
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos
ENUSA	Empresa Nacional de Uranio

ET	Extra-Torácico
EURADOS	Grupo Europeo de Dosimetría de las Radiaciones
EURATOM	Tratado de la Comunidad Europea de la Energía Atómica
EVA	Etileno-Vinil-Acetato
EW	Trabajadores Expuestos
FWHM	Anchura a Mitad de Altura
Gy	Gray
H_T	Dosis equivalente
$H_T(\tau)$	Dosis equivalente comprometida
HML	The Human Monitoring Laboratory, Health Canada
HATM	Modelo del Tracto Alimentario Humano
HPGe	Detectores de Germanio de Alta Pureza
HRTM	Modelo de Tracto Respiratorio Humano
I	Actividad incorporada
ICP	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
ICRU	Comisión Internacional de Unidades Radiológicas
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica
INES	Escala Internacional de Sucesos Nucleares
IRSN	Instituto de Radioprotección de Seguridad Nuclear de Francia
ISO	Organización Internacional de Normalización
JEN	Junta de Energía Nuclear
KKH	Kyoto Kagaku Hyohon
KPA	Analizador por Fosforescencia Cinética

LD	Límite de Detección
LEGe	Low Energy Germanium Germanio de Baja Energía
LLNL	Laboratorio Nacional Lawrence Livermore
LSC	Centelleo en Fase Líquida
M	Actividad medida
m(t)	fracción de retención o excreción
MTL	Nivel mínimo de prueba
NCRP	Consejo Nacional de Protección y Mediciones de Radiación
NaI(Tl)	Yoduro de Sodio dopado con Talio
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPERRA	Consortio Proyecto abierto para el Area de Investigación de la Radiación Europea (Open Project for European Radiation Research Area)
PABS	Fragmentos, Partículas, Agregados y Estado Ligado
PC	Ordenador personal
PCI	Interconexión de Componentes Periféricos, placa base.
PET	Tomografía por Emisión de Positrones
PR	Protección Radiológica
QA	Control de Calidad
RX	Rayos X
R γ	Rayos gamma
ROI	Región de Interés
RSD	División de Seguridad Radiológica de la Oficina de Seguridad Nacional y Coordinación de Emergencias de Estados Unidos
SCK-CEN	Centro de Investigación Nuclear de Belgica

SIA	Síndrome de Irradiación Aguda
SURO	Instituto Nacional de Radioprotección de Republica Checa
TAC	Tomografía Axial Computarizada
TC	Tomografía Computarizada
TE	Trabajadores Expuestos
TH	Vías Torácicas
TPA	Partículas atrapadas y Agregadas
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
USTUR	Registros de Uranio y Transuranidos de Estados Unidos
WBC	Contador de Cuerpo Entero
w_R	Factor de ponderación de la radiación R
w_T	Factor de ponderación del tejido T
α	Radiación alfa
β	Radiación beta
γ	Radiación gamma

Abstract

Determination of internal exposure due to the incorporation of X-ray and gamma emitters in nuclear emergency scenarios (nuclear industry and nuclear medicine)

Nuclear power plants and radioactive facilities can suffer accidents due to their own activity, some natural phenomenon or a terrorist attack, affecting their regular operation and emitting radioactive material outside their facilities, which represents a serious problem in their environment and causing damage to the population and to the environment.

The pathways of intake of radionuclides into the body are mainly through inhalation, ingestion, injection and through the skin. The contaminating radionuclides once incorporated into the body and absorbed in blood and lymph, are distributed throughout the body, being retained preferentially in some organs and tissues.

Based on the knowledge of the metabolic behavior of internal contaminants, the following counting geometries have been defined: the iodine has to be measured in thyroid geometry, the activation and fission products (γ emitters) have muscles and blood as target tissues, and therefore, they remain retained throughout the body. Plutonium oxide (insoluble compound) is usually incorporated by inhalation, it is convenient to measure it in lungs, where it remains for a long time until it is absorbed by the blood, to distribute itself in the organism, and like Americium, it has the liver and bone of target organs, where remains, practically, lifetime. On the other hand, the incorporation through wounds can occur in the workplaces, affecting exposed workers (EW); part of the contamination remains retained in the own wound and another part is rapidly distributed through the blood.

In a nuclear emergency, it is necessary to develop fast and effective methods to ensure internal dosimetry for exposed workers and members of the public. The Whole Body Counter Laboratory (WBC) of the Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) has implemented techniques to determine iodine in thyroid and gamma emitters radionuclides throughout the body for different age groups including children (1, 5, 10, 15 years) and adults. CIEMAT-WBC has also developed a method to measure plutonium in lungs, only for emergencies, which enables a first evaluation when internal exposures involving this radionuclide are very high. In addition, the WBC has implemented a new methodology to calibrate and measure X-ray and gamma emitters in wounds at different depths. On the other hand, in cases of

accidents that occurred some time ago, the measurement technique of americium activity in skull allows to determine the activity deposited in bone for children and adults.

Two different equipments have been used in this thesis. The LEGe (Low Energy Germanium) detection system consists in four low-energy detectors that measure X-ray and low γ -ray energy emitters. It is inside the shielded chamber with low radioactive background. The Fastscan counter operates with of two vertical INa(Tl) detectors that allow to measure of gamma emitters, with a stand up geometry in few minutes counting time.

The calibration phantoms used in this work were made with equivalent materials to different human tissues. In this work, children neck phantoms for the monitoring of ^{131}I in thyroid were designed, they were manufactured at CIEMAT where the adult male whole body BOMAB phantoms were also fabricated with sources of ^{57}Co , ^{137}Cs and ^{60}Co . Its pieces were used to assemble the whole body phantoms for children with 1, 5, 10 and 15 years old and adult female. The torso phantom with different layers of various thoracic thickness was used to calibrate plutonium in lungs which allowed to calibrate a multilayer efficiency for the different thicknesses. All of these permit assessing in a realistic way the ^{239}Pu activity in lungs. The skull phantoms were an adult man and 2-year-old boy with contamination of ^{241}Am in the bone equivalent material. Finally, the wound phantoms consist in two circular radioactive sources of material simulating adipose tissue, with a contamination of ^{241}Am , ^{57}Co and ^{137}Cs and of ^{133}Ba and ^{89}Sr .

In this work, these new *in vivo* methods have been implemented with calibrations that allow to measure internal exposures in population at risk of incorporation of X-ray and gamma emitters in scenarios of radiological and nuclear emergencies. In addition, relations have been obtained in different calibrations of the efficiency as a function of energy, detector distance, thoracic thickness and wound deep.

The calibrations of the LEGe detectors and the Fastscan counter for the measurement of ^{131}I in the thyroid and gamma emitters throughout the total body vary depending on the size of the phantom, being more efficient for smaller sizes (1-5 year old children). In the case of plutonium in lung calibration using LEGe detector system, the greatest efficiencies correspond to the smallest thoracic thickness. The bone calibration was performed by measuring in the most efficient head area, between the parietal and frontal bones; the most efficient is the child skull. Wound calibrations were performed at different depths, with the result the most superficial ones are the most efficient. The use of different calibration phantoms for adults and children allows us to measure realistic activities improving the response in emergencies.

The detection limits of activities in all calibrations correspond to committed effective dose, due to internal exposure, lower than the registration level for workers and the annual dose limit for the public of 1 mSv/year, except in the case of plutonium in lungs and americium in bone. These methods would only be useful to measure in very high contamination events, and in any case, always complemented with *in vitro* techniques of excreta analyses in a bioelimination laboratory.

For all the above, the Whole Body Counter Laboratory of CIEMAT, thanks to the results of this doctoral thesis, has improved its capabilities for the *in vivo* measurement of exposed persons, extending the scope of its experimental methods not only to workers but to members of the public of various ages potentially internal exposure in case of radiological or nuclear emergency.

Resumen

Determinación de exposición interna por incorporación de emisores de rayos X y gamma en escenarios de emergencia nuclear (industria nuclear y medicina nuclear)

Las centrales nucleares e instalaciones radiactivas pueden sufrir accidentes por su propia actividad, por algún fenómeno de la naturaleza o por un ataque terrorista que afecte a su funcionamiento emitiendo material radiactivo al exterior de sus instalaciones, representando un grave problema en su entorno y produciendo daños a la población y al medioambiente.

Las vías de incorporación de las contaminaciones en el organismo son principalmente por inhalación, ingestión, inyección y a través de la piel. Los radionucleidos contaminantes una vez incorporados en el organismo y absorbidos en sangre y linfa, son distribuidos por todo el cuerpo permaneciendo retenidos de forma preferente en algunos órganos y tejidos.

En base al conocimiento del comportamiento metabólico de los contaminantes internos están definidas las geometrías de contaje siguientes: el yodo radiactivo se ha de medir en geometría de tiroides, los productos de activación y fisión (emisores γ) tienen tejidos diana en músculos y sangre, por tanto, permanecen retenidos en todo el organismo. El óxido de plutonio (compuesto insoluble), incorporado normalmente vía inhalación, es conveniente medirlo en pulmón, donde permanece durante largo tiempo hasta que es absorbido por la sangre para distribuirse en el organismo, y como el americio, tiene los órganos diana en el hígado y el hueso, en donde permanecen, prácticamente, toda la vida. Por otro lado, la incorporación a través de las heridas suele ocurrir en los centros de trabajo, afectando a Trabajadores Expuestos (TE); parte de la contaminación permanece retenida en la propia herida y otra parte se distribuye rápidamente por la sangre.

En una emergencia nuclear, es necesario desarrollar métodos rápidos y efectivos para garantizar la dosimetría interna de los trabajadores y de la población expuesta. El Laboratorio del Contador de Radiactividad Corporal (CRC) del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) ha implementado técnicas para determinar el yodo en tiroides y radionucleidos emisores gamma en todo el cuerpo para diferentes grupos de edad en niños (1, 5, 10, 15 años) y adultos. Ha desarrollado un método para medir plutonio en pulmón, exclusivamente para emergencias, que permite hacer una primera valoración cuando existen contaminaciones muy altas. Además, el CRC ha implantado una nueva metodología para calibrar y medir contaminación

radiactiva de emisores de Rayos X y gamma en heridas en diferentes profundidades. Por otra parte, para casos de accidentes que ocurrieron ya hace tiempo o en incorporaciones crónicas, la técnica de medida de actividad de americio en cráneo permite determinar la actividad depositada en el esqueleto en adultos y niños.

Para el trabajo de esta tesis se han utilizado dos equipos de medida. El sistema de detección LEGe (Low Energy Germanium) consistente en cuatro detectores de germanio que mide emisiones de RX y radiación gamma de baja energía, está situado en el interior de una cámara blindada de bajo fondo radiactivo. El contador Fastscan lo forma dos detectores NaI(Tl), que permite medir radionucleidos emisores gamma en geometría de pie, en unos pocos minutos.

Los patrones de calibración utilizados están fabricados con materiales simuladores de tejidos humanos. En este trabajo se diseñaron los maniqués de cuello de niños para la medida de ^{131}I en tiroides, se fabricaron en el CIEMAT, donde también se fabricaron los maniqués de cuerpo entero BOMAB de hombre adulto con las fuentes de ^{57}Co , ^{137}Cs y ^{60}Co . Sus piezas se ensamblaron para reproducir los maniqués de todo el cuerpo en niños con 1, 5, 10 y 15 años y mujer adulta. El patrón de torso de hombre adulto con diferentes capas de espesor torácico se utilizó para calibrar plutonio en pulmón en multicapa y así, calcular de una forma realista las actividades de ^{239}Pu . Los maniqués de cráneo fueron de hombre y niño de 2 años con contaminación de ^{241}Am en material equivalente a hueso. Los maniqués de herida consistían en dos fuentes radiactivas circulares simuladoras de tejido adiposo, con contaminaciones de ^{241}Am , ^{57}Co y ^{137}Cs y de ^{133}Ba y ^{89}Sr .

En este trabajo, se han puesto en marcha estos nuevos métodos *in vivo*, con calibraciones que permiten medir la exposición interna de público con riesgo de incorporación de radionucleidos emisores de rayos X y gamma en escenarios de emergencia radiológica y nuclear. Además, se han obtenido relaciones en algunas calibraciones de la eficiencia en función de la energía, de la distancia al detector, del espesor torácico y de la profundidad de la herida.

Las calibraciones de los detectores LEGe y del contador Fastscan para la medida de ^{131}I en tiroides y de emisores gamma en todo el organismo varían dependiendo del tamaño del maniquí, siendo más eficientes los tamaños más pequeños (niños de 1-5 años). En el caso de la calibración del plutonio en pulmón con el sistema LEGe, las eficiencias más altas corresponden a los espesores torácicos menores. La calibración de americio en hueso se realizó midiendo en la zona más eficiente de la cabeza, entre los huesos parietal y frontal, siendo la más eficiente la del niño. Las calibraciones de heridas se

efectuaron a diferentes profundidades, resultando más eficientes cuanto más superficiales. El uso de maniquíes de calibración adecuados para adultos y niños permite medir actividades realistas mejorando la respuesta en emergencias.

Los límites de detección de las actividades en todas las calibraciones corresponden a dosis efectiva comprometida por exposición interna menor que el nivel de registro de TE y que el límite anual de dosis para el público de 1 mSv/año, exceptuando el caso del plutonio en pulmón y americio en hueso. Estos últimos métodos sólo serían útiles para medir en casos de muy alta contaminación, y siempre complementado por técnicas *in vitro*, con medidas de excretas en un laboratorio de bioeliminación.

Por todo lo expuesto, gracias a los resultados de esta tesis doctoral, el CRC-CIEMAT ha mejorado sus capacidades para la medida *in vivo* de personas expuestas, ampliando el alcance de sus métodos experimentales a TE y miembros del público de varias edades con exposición interna en caso de emergencia radiológica o nuclear.

Introducción

El ser humano está expuesto a radiaciones ionizantes debidas al fondo natural y a las fuentes de origen artificial. La utilización de fuentes de radiaciones ionizantes artificiales, en sus inicios, supuso un gran desarrollo científico y un avance social desde su descubrimiento a final del siglo XIX, pero pronto se pusieron de manifiesto los daños que podían producir en la salud y se vio la necesidad de establecer un programa de medidas de protección radiológica.

La protección radiológica tiene la finalidad de proteger a las personas y al medio ambiente contra los efectos nocivos debidos a la exposición a las radiaciones ionizantes. La normativa y reglamentación de los países en materia de protección radiológica está basada en las recomendaciones y asesoramiento de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y se define por tres principios:

La **justificación** de la práctica con radiaciones ionizantes debe de suponer un beneficio neto positivo para la sociedad.

La **optimización** de la práctica de trabajo con radiaciones ionizantes es mantener la exposición a las radiaciones tan baja como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta consideraciones socio-económicas, según el criterio ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

Los **límites de dosis** establecidos en las normativas de los países implican que las dosis debidas a la exposición de las radiaciones ionizantes sobre los individuos deben de estar sujetas a una limitación, o a algún mecanismo de control de riesgo para asegurar una protección adecuada a las personas y al medio ambiente.

La dosimetría de las radiaciones ionizantes es una parte esencial de la protección radiológica, tiene la doble finalidad de justificar una práctica realizando el balance entre el beneficio-detrimento y confirmar que no se superen los límites de dosis sobre los individuos expuestos.

La dosimetría de radiaciones ionizantes se considera exposición externa cuando el organismo se irradia con una fuente externa al cuerpo y las dosis son medidas y estimadas con exactitud y precisión mediante dosímetros. La dosimetría de la radiación interna se refiere a situaciones en las que las personas han incorporado radionucleidos en el interior de su organismo irradiando a los órganos y tejidos durante el tiempo que

dura la contaminación, hasta su completa eliminación. La exposición interna se produce a través de unas vías de incorporación que son la inhalación, la ingestión, o a través de la piel. La exposición interna puede ser de tipo ocupacional (trabajadores), exposición del público o puede darse en pacientes de medicina nuclear.

Para estimar la dosis por exposición interna debida a las radiaciones ionizantes en una persona contaminada es necesario determinar la actividad (Bq) del contaminante incorporado en el organismo en el momento de la exposición, a partir de datos de actividad medida (Bq) en el cuerpo o de muestras biológicas en tiempos posteriores a la incorporación. La actividad de los radionucleidos dentro del cuerpo se reduce por el decaimiento radiactivo y por eliminación biológica (principalmente vía excreción).

Existen diferentes técnicas espectrométricas que permiten medir la actividad retenida en el cuerpo o en excretas (orina y heces principalmente) de los radionucleidos incorporados, con el fin de evaluar tanto la actividad incorporada, I [Bq], como la dosis efectiva comprometida, ***E(50)*** o ***E(70)*** en Sieverts [Sv], aplicando modelos metabólicos específicos que describen el comportamiento del contaminante dentro del cuerpo y que dependen de sus características físico-químicas y biológicas.

Dependiendo del tipo de contaminante que se haya incorporado se utilizan unas técnicas espectrométricas u otras. Las técnicas de medidas *in vitro* se utilizan convencionalmente para la determinación de radionucleidos que emiten radiaciones alfa, α , beta, β , y gamma, γ . Las radiaciones alfa y beta son poco penetrantes y se miden en muestras de excretas, empleando técnicas de espectrometría alfa o beta (LSC- Liquid Scintillation Counting) o de espectrometría de masas, y en general requieren una etapa previa de tratamiento radioquímico muy laborioso y la obtención de resultados que en algunos casos puede durar varias semanas. Las técnicas de medida *in vivo* se utilizan para medir radionucleidos incorporados en el organismo que son capaces de detectarse desde el exterior. Se trata de identificar y cuantificar emisores de radiación X y gamma retenidos en órganos y tejido, o en todo el cuerpo tras la incorporación. Son medidas que se realizan directamente sobre la persona con detectores externos y los resultados se obtienen inmediatamente al finalizar la medida mediante espectrometría gamma.

La investigación de la metodología *in vivo* es necesaria para desarrollar nuevas técnicas que permitan medir la actividad retenida en el organismo tras una exposición interna, de una forma precisa y rápida para los casos de emergencias radiológicas y nucleares, en los que se puede ver afectada gran parte de la población. Habitualmente, las metodologías disponibles en los laboratorios de los contadores de radiactividad corporal son para medir a los trabajadores expuestos, en general, hombres y estas son las que se

han utilizado hasta ahora en caso de emergencia para medir a la población afectada en una situación de accidente.

Las medidas directas, *in vivo*, se realizan sobre la vía de entrada (por ej. pulmones, heridas) en todo el organismo, o en el órgano o tejido diana (por ej. tiroides) donde se depositan de forma preferente los radionucleidos incorporados. Los radionucleidos contaminantes del interior del organismo una vez que pasan a sangre tienen afinidad por permanecer en órganos o tejidos específicos. Así por ejemplo, el yodo tiene como órgano diana al tiroides, los actínidos y el estroncio el hueso, el cesio y el cobalto permanecen en el músculo. En los órganos diana es donde se retiene la mayor cantidad del radionucleido contaminante incorporado.

A raíz del accidente que ocurrió en la central nuclear de Fukushima Daichii el 11 de marzo del año 2011, está en aumento el interés de disponer de calibraciones apropiadas para trabajadores y público de distintas edades en todos los contadores de radiactividad corporal del mundo. Se pretende garantizar la fiabilidad de los resultados de la actividad medida en el cuerpo de los radionucleidos que se pueden incorporar tras un accidente de una central nuclear o en actividades de medicina nuclear de un hospital. La preocupación social se incrementa cuando se pone de relieve el riesgo de fenómenos naturales (terremotos, maremotos) así como de ataques terroristas que suponen un peligro en la seguridad física de este tipo de instalaciones.

El objetivo primordial de este trabajo de Tesis Doctoral es realizar nuevas calibraciones de los equipos de detección del laboratorio de Contador de Radiactividad Corporal del Ciemat, con los sistemas de detección disponibles, un contador Fastscan, de dos detectores de centelleo NaI(Tl) colocados en columna, y el sistema Low Energy Germanium (LEGe), con 4 detectores de semiconductor de bajas energías, y con maniqués de diferentes tamaños y formas para adultos y niños de distintas edades, con el fin de mejorar la cuantificación de la actividad en las medidas que se realicen a la población que ha incorporado radionucleidos en el organismo debido a una emergencia radiológica o nuclear.

En caso de emergencia radiológica o nuclear, no solo los adultos tienen riesgo de exposición interna (y también externa), los niños y las niñas pueden verse afectados por el accidente y por ello es necesario mejorar la respuesta en el campo de la dosimetría interna para esta parte de la población. Las medidas *in vivo* tienen la ventaja de obtener una respuesta rápida cuando los contaminantes internos son emisores de radiación X o gamma. La rapidez es importante para los casos en que las incorporaciones fuesen altas con el fin de posibilitar el tratamiento médico eficaz de descontaminación y también

contribuye a mejorar la toma de decisiones en respuesta de la emergencia (por ej. evacuación).

Este trabajo se realizó en varias fases, que se exponen en la estructura de la Tesis Doctoral y se reflejan en el índice. Inicialmente, se presentan los antecedentes de accidentes radiológicos y nucleares más relevantes que han tenido lugar a lo largo de la historia, que es en el marco donde esta tesis puede contribuir en la mejora de fiabilidad de los resultados de las medidas de actividad de material radiactivo que permanece en el organismo humano y, como consecuencia, de la estimación dosimétrica en caso de exposición interna.

Una parte de la tesis se dedicó a la determinación de ^{131}I en tiroides. En accidentes nucleares y radiactivos, como por ejemplo en plantas nucleares y en instalaciones de medicina nuclear, se emiten a la atmosfera diferentes radioisótopos de yodo, y gran parte de la población puede estar expuesta a este tipo de contaminación. El objetivo en esta fase fue la fabricación de unos maniqués de niños de diferentes edades y mujer que simularan el cuello y la glándula tiroides de forma realista, para realizar calibraciones dependientes de la edad del individuo expuesto con dos sistemas de detección: detectores de semiconductor LEGe y contador Fastscan (2 detectores NaI(Tl)) que operan en el laboratorio del CRC del Ciemat. Se trata de determinar la actividad (Bq) de ^{131}I en tiroides de individuos potencialmente contaminados. Además se realizaron medidas blanco para los cálculos de los límites de detección en cada uno de los casos.

En el siguiente capítulo, se realizó un estudio para la determinación de radionucleidos productos de activación, fisión y utilizados en radiodiagnóstico y en terapia en el campo de la medicina nuclear, emisores gamma en geometría de organismo total con los sistemas de detección Fastscan y LEGe. Los radionucleidos emisores de RX y gamma, que tienen órganos y tejidos diana distribuidos por todo el cuerpo, pueden ser detectados con este método. A partir de las piezas de un maniquí BOMAB que simula un hombre, se compusieron diferentes configuraciones con el fin de simular niños de diferentes edades y mujer, para realizar calibraciones en las diferentes geometrías que permitan mejorar la actividad medida de los diferentes radionucleidos considerados. También se realizaron las medidas blanco para el cálculo de los límites de detección en varios radionucleidos de interés, procedentes de plantas nucleares y de medicina nuclear.

A continuación, se realizó un estudio de la medida de plutonio en pulmón, teniendo en cuenta que inicialmente, y en caso de óxidos durante largo tiempo (meses, años), permanece en el órgano de transporte, en los pulmones, hasta que es absorbido por la sangre. La calibración de plutonio en pulmón mejora la toma de decisiones cuando las

contaminaciones son elevadas (el límite de detección en esta geometría de contaje es muy elevado).

Después, se desarrolló un estudio de americio en hueso. En incorporaciones crónicas o cuando ya han pasado meses después de una contaminación aguda de americio, o incluso por contaminación de plutonio que decae en americio, una vez absorbido en sangre éste se deposita en hueso de forma preferente. Se efectuó un estudio de la retención de ^{241}Am en cráneo, con el fin de determinar las zonas más eficientes para la detección del americio en geometría de cabeza y proceder a calibrar en la configuración más adecuada. El objetivo final es extrapolar la actividad de americio en todo el esqueleto.

El último capítulo se dedica a la calibración de heridas, que pueden producirse en centros de trabajo donde la manipulación de radionucleidos es habitual. Los maniqués simuladores de heridas estaban contaminados con emisores γ . Se utilizaron para calibrar heridas en diferentes profundidades y permitir medir la actividad retenida en las heridas.

Capítulo 1: Escenarios de emergencias radiológicas y nucleares.

Antecedentes.

1.1. Introducción

Al finalizar el año 2016[1], en 31 países del mundo había 447 reactores en situación de operación. La producción de electricidad de origen nuclear fue de 2.496,49 TWh, lo que representa aproximadamente el 11,5 % de la electricidad total consumida en el mundo. En la Unión Europea, 14 de los 28 estados miembros tenían centrales nucleares en operación, con un total de 129 reactores, que produjeron cerca del 27,5 % del total de la electricidad consumida en el conjunto de la Unión Europea.

En esa misma fecha, el parque nuclear español[1] estaba formado por 8 reactores nucleares en 6 emplazamientos. Durante el año 2016, la energía eléctrica neta producida en las centrales nucleares españolas fue de 56.100 GWh, lo que representó el 21,39 % del total de la producción eléctrica del país.

Las centrales nucleares españolas[1] disponen, dentro de sus propias instalaciones, de piscinas construidas para almacenar temporalmente el combustible irradiado y de un Almacén Temporal Individualizado (ATI) en seco, residuos de alta y muy alta actividad.

Existe un centro de almacenamiento de residuos radiactivos de muy baja, baja y media actividad de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), situado en El Cabril en Hornachuelos (Córdoba). Hasta el 2016[1] tenía almacenado 43.029,84 m³ de residuos radiactivos.

En España existe la fábrica de elementos combustibles de ENUSA (Industrias Avanzadas S.A.) en Juzbado (Salamanca). En 2016 fabricó[1] 291 tU (toneladas de uranio), suministró a las centrales nucleares españolas 131 tU (35 % de la producción) el resto lo dedicaron a la exportación.

Otra actividad relacionada con el sector nuclear es del desmantelamiento. Ya se finalizó el desmantelamiento central nuclear Vandellos I en L'Hospitalet de l'Infant (Tarragona). Actualmente se está ejecutando el desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera, en Almonacid de Zorita (Guadalajara), y se está ya elaborando el plan para el desmantelamiento de la central nuclear de Sta. María de Garoña (Burgos).

Los reactores nucleares existentes, el uso de materiales y equipos que emiten radiaciones ionizantes en la industria y la medicina y los nuevos usos que se dan a las

radiaciones ionizantes pueden dar lugar a incidentes o accidentes, provocando situaciones de emergencia.

A pesar de las altas medidas de seguridad en las centrales nucleares e instalaciones radiactivas, no están exentas de sufrir algún fenómeno de la naturaleza o ataque terrorista lo suficientemente potente como para que afecte a su funcionamiento, y que puedan emitir material radiactivo al exterior de sus instalaciones, representando un grave problema en su entorno produciendo daños a la población y al medioambiente. Además, el incremento de uso de material radiactivo en medicina para tratamiento y diagnóstico hace aumentar el riesgo potencial de contaminación en zonas con gran densidad demográfica.

Una **emergencia nuclear**[2] es cuando el suceso se produce en una central nuclear que ha perturbado su funcionamiento normal ocasionando un accidente en el que fallan los sistemas de protección del reactor, ocurren errores de operación en la instalación o existe la posibilidad de alcanzar niveles anormales de exposición a radiaciones ionizantes o de contaminación radiactiva dentro o fuera del emplazamiento de la central.

Una **emergencia radiológica** es cuando el suceso ocurre en una instalación radiactiva y se perturba su funcionamiento normal y puede llegar a originar un accidente con consecuencias para la instalación, sus trabajadores, la población o el medio ambiente. En general, las emergencias radiológicas suelen tener consecuencias de menor escala que las nucleares, ya que la actividad de sus productos radiactivos es bastante menor que la de las centrales nucleares.

Es importante mantener una respuesta adecuada en protección radiológica para evitar al máximo el riesgo que supone trabajar con radiaciones ionizantes. Para determinar la dosis personal debida a la exposición de las radiaciones ionizantes existen las magnitudes dosimétricas basadas en las publicaciones ICRP 60 e ICRP 103[3, 4], que se describen a continuación.

La **dosis absorbida**, **D**, depende de la energía depositada en la masa de un órgano, se utiliza para todos los tipos de radiación ionizante y está definida por la ecuación 1.1.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1.1)$$

Donde **d $\bar{\epsilon}$** es la energía media impartida por la radiación ionizante a la masa **dm**. La unidad del SI de la dosis absorbida es Julio partido kilogramo, [J/kg] cuyo nombre es Gray [Gy].

La **dosis equivalente**, H_T , es la dosis que absorbe un órgano o tejido dependiendo del tipo de radiación, R, está dada por la ecuación 1.2.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (1.2)$$

$D_{T,R}$ es la dosis absorbida por un órgano o tejido, con una radiación R, el w_R es el factor de ponderación de la radiación R. La unidad de medida de la dosis equivalente es [J/kg] o Sievert [Sv].

La **dosis efectiva**, E , es la dosis equivalente en cada tejido, para calcularlo se realiza la suma ponderada de las dosis equivalentes en todos los tejidos, ver la ecuación 1.3.

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (1.3)$$

w_T es el factor de ponderación para el tejido T

La suma de las dosis equivalentes se realiza sobre todos los órganos y tejidos del cuerpo humano que son sensibles a la inducción de efectos estocásticos debido a la radiación R. La suma de los factores de ponderación de los tejidos es 1, $\sum_T w_T = 1$. La unidad de medida de la dosis efectiva es [J/kg] o Sievert [Sv].

Los radionucleidos incorporados irradian a los tejidos del cuerpo humano durante un tiempo determinado en función del periodo de semidesintegración físico y de la retención biológica dentro del cuerpo, y dan lugar a dosis en los órganos y tejidos del organismo durante un tiempo después de la incorporación.

Tras una exposición interna, la **dosis equivalente comprometida**, $H_T(\tau)$, que se espera en un tejido T en un periodo de tiempo τ está definida por la ecuación 1.4.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H_T(t) dt \quad (1.4)$$

Donde τ es el tiempo de integración a partir de la incorporación en t_0 , se calcula 50 años para adultos y hasta la edad de 70 años para los niños. La dosis equivalente comprometida es la dosis total que se espera será impartida dentro del tiempo especificado. La unidad de medida de la dosis equivalente comprometida es [J/kg] o Sievert [Sv].

La **dosis efectiva comprometida**, $E(\tau)$, se calcula a partir de la dosis equivalente comprometida y con el factor de ponderación de tejido, ver ecuación 1.5. Su unidad de medida es [J/kg] o Sievert [Sv].

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau) \quad (1.5)$$

La dosis efectiva comprometida también se puede calcular a partir de la incorporación de actividad en el organismo, aplicando los coeficientes de dosis dados por la publicación ICRP 119[5] para miembros del público de varias edades y para trabajadores ocupacionalmente expuestos, según la ecuación 1.6.

$$E(\tau) = e(\tau) \cdot I \quad (1.6)$$

Donde $e_j(50)$ ó $e_j(70)$ es el **coeficiente de dosis** está dado por la publicación ICRP 119[5] e ICRP 71[6] y depende del radionucleido, de la edad de la persona que ha incorporado la contaminación, de la vía de entrada, de las características físicas y químicas de la incorporación, del tamaño y de la forma química de las partículas.

La dosis efectiva comprometida se calcula, al igual que la dosis equivalente comprometida, para los 50 años siguientes en el caso de los adultos y hasta la edad de 70 años para el caso de los niños.

I [Bq] es la **actividad incorporada** de un radionucleido, por una vía de incorporación: ingestión, inhalación o a través de la piel, y se calcula con la ecuación 1.7. La estimación de la actividad incorporada, I [Bq], depende de la actividad medida, M [Bq], y de la **fracción de retención o excreción**, $m(t)$, en función del tiempo, en días, después de la incorporación, que se obtienen de las publicaciones de ICRP (actualmente ICRP78[7] para trabajadores, también disponibles en la norma ISO 27048[8]),

$$I = \frac{M}{m(t)} \quad (1.7)$$

La **actividad medida**, M , depende del tipo de técnica utilizada en la medida, será actividad retenida en el organismo [Bq] si la técnica es *in vivo*, y actividad excretada [Bq/día, Bq/l] si la técnica es *in vitro* (de análisis de excretas).

Si como consecuencia de la irradiación, se produce la muerte de un número de células suficientemente elevado de un órgano o tejido, habrá una pérdida de función del órgano, que se conoce como **efecto determinista**. La gravedad de los efectos deterministas es proporcional a la dosis de radiación recibida, siempre y cuando ésta sea mayor que la dosis umbral, dosis que establece el límite entre la aparición o no del efecto. Estos efectos ocurren tras exposición a dosis relativamente altas, poniéndose de manifiesto a medio-corto plazo.

Como consecuencia de la exposición a radiación la célula puede ser que no muera, sino verse modificada (mutada), hablándose de **efecto estocástico**. Este efecto ocurre tras dosis moderadas y bajas de la exposición a la radiación y se ponen de manifiesto a medio-largo plazo. La gravedad de los efectos estocásticos no es proporcional a la dosis

recibida, pero sí la probabilidad de que tenga lugar el efecto. Aunque siguen existiendo discrepancias al respecto, para la estimación de riesgos de efectos estocásticos se considera que no existe dosis umbral para su aparición.

Los límites de dosis persiguen establecer un nivel de dosis por encima del cual las consecuencias para la salud del individuo serían consideradas como “inaceptables”. Los límites de dosis para público en general y para trabajadores se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Límites de dosis recomendados por la ICRP 103[4] en situaciones de exposición planificada¹

Límite	Ocupacional	Público
<i>Dosis efectiva</i>	20 mSv/ año Promediada en períodos definidos de 5 años ²	1 mSv/ año
<i>Dosis equivalente anual</i>		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	----

¹Es la suma de la dosis efectiva debida a exposiciones externas y la dosis efectiva comprometida debida a exposiciones internas en el mismo periodo.

²La dosis efectiva no debe exceder de 50 mSv en cada año. Para trabajadoras expuestas embarazadas aplica restricciones de público.

1.2. Accidentes e incidentes nucleares y radiológicos

Los accidentes e incidentes se clasifican según el impacto de las consecuencias sobre las personas y el medio ambiente, en lo que se refiere a las dosis de radiación en las personas y el medio ambiente. La escala INES[9] es un instrumento que se utiliza a nivel internacional para comunicar la importancia de los sucesos nucleares y radiológicos desde el punto de vista de la seguridad. Los sucesos se clasifican en 7 niveles. Los clasificados de los niveles 1-3 se denominan incidentes, y los de 4-7 son accidentes, como se describe en la Figura 1.1. El aumento de cada nivel indica que la gravedad de los sucesos es de aproximadamente diez veces superior.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS NIVELES DE LA INES			
Nivel de la INES	Personas y medio ambiente	Barreras y controles radiológicos	Defensa en profundidad
Accidente grave Nivel 7	<ul style="list-style-type: none"> Liberación grave de materiales radiactivos con amplios efectos en la salud y el medio ambiente, que requiere la aplicación y prolongación de las contramedidas previstas. 		
Accidente importante Nivel 6	<ul style="list-style-type: none"> Liberación importante de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de las contramedidas previstas. 		
Accidente con consecuencias de mayor alcance Nivel 5	<ul style="list-style-type: none"> Liberación limitada de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de algunas de las contramedidas previstas. Varias defunciones por radiación. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños graves en el núcleo del reactor. Liberación de grandes cantidades de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de exposición del público; provocada posiblemente por un incendio o un accidente de criticidad grave. 	
Accidente con consecuencias de alcance local Nivel 4	<ul style="list-style-type: none"> Liberación menor de materiales radiactivos, con escasa probabilidad de tener que aplicar las contramedidas previstas, salvo los controles locales de alimentos. Al menos una defunción por radiación. 	<ul style="list-style-type: none"> Fusión de combustible o daño al combustible, que provoca una liberación superior al 0,1% del inventario del núcleo. Liberación de cantidades considerables de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de importante exposición del público. 	
Incidente importante Nivel 3	<ul style="list-style-type: none"> Exposición diez veces superior al límite anual establecido para la exposición de los trabajadores. Efecto no letal de la radiación en la salud (p. ej., quemaduras). 	<ul style="list-style-type: none"> Tasas de exposición superiores a 1 Sv/h en una zona de operación. Contaminación grave en una zona no prevista en el diseño, con escasa probabilidad de exposición importante del público. 	<ul style="list-style-type: none"> Quasi accidente en una central nucleoelectrica sin disposiciones de seguridad pendientes de aplicación. Pérdida o robo de fuentes selladas de radiactividad alta. Entrega equivocada de fuentes selladas de radiactividad alta, sin que existan procedimientos adecuados para manipularlas.
Incidente Nivel 2	<ul style="list-style-type: none"> Exposición de una persona del público por encima de 10 mSv. Exposición de un trabajador por encima de los límites anuales reglamentarios. 	<ul style="list-style-type: none"> Niveles de radiación superiores a 50 mSv/h en una zona de operación. Contaminación importante dentro de una instalación en una zona no prevista en el diseño. 	<ul style="list-style-type: none"> Fallos importantes en las disposiciones de seguridad, aunque sin consecuencias reales. Hallazgo de una fuente sellada huérfana, de un dispositivo o de un embalaje para el transporte de radiactividad alta, con indicación de las disposiciones de seguridad, sin que haya habido menoscabo. Embalaje inadecuado de una fuente sellada de radiactividad alta.
Anomalia Nivel 1			<ul style="list-style-type: none"> Sobreexposición de una persona del público por encima de los límites anuales reglamentarios. Problemas menores en componentes de seguridad, con importantes medidas de defensa en profundidad pendientes de aplicación. Pérdida o robo de fuentes radiactivas, de dispositivos o de embalaje para el transporte de actividad baja.
SIN SIGNIFICACIÓN PARA LA SEGURIDAD (Debajo de la escala/Nivel 0)			
<p>Fotografías: cortesía de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, Central nucleoelectrica de Genkai (Japón)/Kyushu Electric Power Co., J. Mairs/OIEA</p>		<p>Organismo Internacional de Energía Atómica Colección de Información / División de Información Pública 08-26943 / S Corr.</p>	

Figura 1.1: Descripción de la escala Internacional de sucesos nucleares y radiológicos (INES)

Es importante que todos los sucesos nucleares y radiológicos se comuniquen con exactitud y prontitud para tomar las medidas adecuadas, con el fin reducir al máximo las consecuencias para la población y el medioambiente y para evitar que información confusa sea propagada por los medios de comunicación.

1.2.1. Reactores nucleares

Una central nuclear[10] es una instalación que aprovecha el calor obtenido con la fisión de los núcleos de combustible (uranio o plutonio) para producir energía eléctrica. Las centrales nucleares constan de un reactor que permite iniciar y controlar la reacción en cadena de la fisión nuclear (ver Figura 1.2). El calor generado en dicha reacción se utiliza para calentar el agua y convertirlo en vapor el cual se emplea para accionar una turbina y a través de un generador producir energía eléctrica. Consta de un edificio de contención en el que se alojan el reactor, los generadores de vapor, el depósito y las bombas del refrigerante, el edificio de turbinas, el edificio de combustible que consiste de un almacenamiento de combustible no usado y otro de combustible gastado.

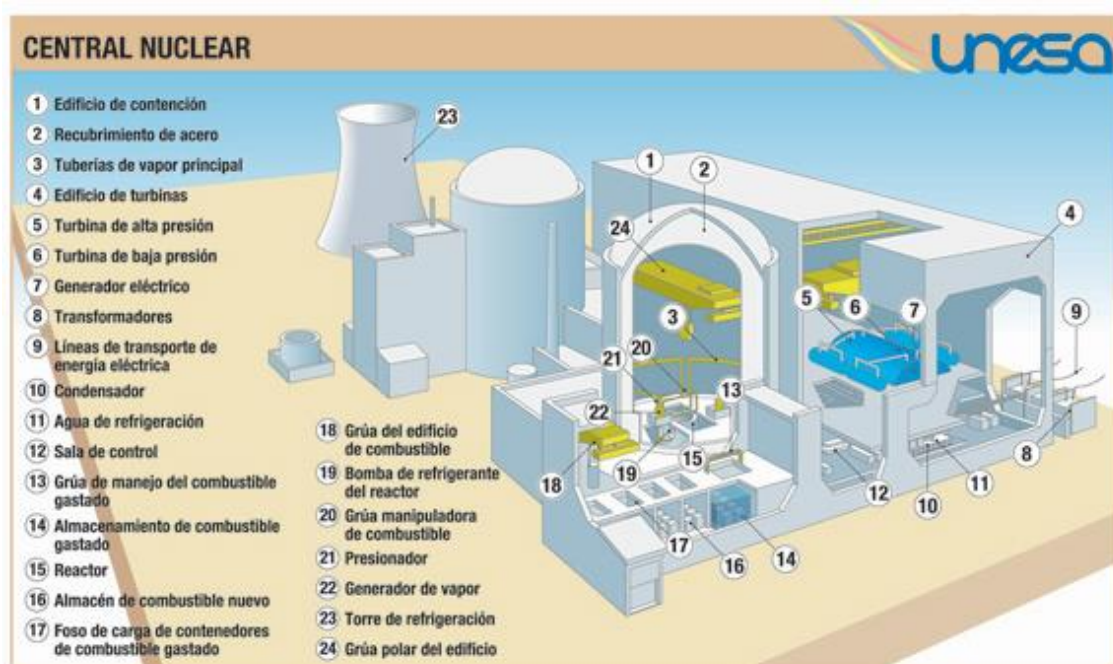


Figura 1.2: Esquema de una central nuclear. Fuente: Unesa

A lo largo de la historia se han producido varios accidentes nucleares, lo suficientemente graves como para que afecte a la población en general. Los más importantes a nivel internacional han sido los de Three Mile Island, Chernóbil y Fukushima[11]. Estos dos últimos han sido los más graves para la población.

Three Mile Island es una central nuclear que se encuentra en el estado de Pensilvania en Estados Unidos. Se produjo un accidente[11] el 28 de marzo de 1979 por la falta de refrigeración del núcleo de reactor. Como consecuencia en unos minutos se emitió a la barrera de contención alrededor del 40 % de todo el material radiactivo del núcleo, aumentando en algunas zonas hasta niveles de 1000 veces el nivel normal. Esto provocó

la emisión de 630 GBq[12] de actividad de ^{131}I a la atmósfera y 660 PBq se quedaron en el interior de la barrera de contención. Se detectaron en el interior del edificio de contención, circuito primario y tanques auxiliares cantidades considerables de cesio y estroncio, que no llegaron a emitirse a la atmósfera. Dos días después del accidente, consideraron el peligro latente y se aconsejó que las mujeres embarazadas y los niños de edad preescolar abandonaran la zona de unos 8 km, lo que provocó la evacuación de 100000 personas situadas a 40 km de la central. Tres trabajadores recibieron una dosis efectiva de 40 mSv. No hubo efectos sobre la salud de trabajadores y público registrados. El accidente fue clasificado en la escala INES con nivel 5.

Chernóbil se encuentra en el norte de Ucrania a 130 km de Kiev y a 20 km de Bielorrusia. El accidente nuclear se produjo el 26 de abril de 1986[13], debido principalmente a un diseño inadecuado del reactor que tenía gran inestabilidad cuando funcionaba a poca potencia. Puso en evidencia la falta de preparación de los operadores y la falta de cultura de seguridad radiactiva en el equipo humano.

Se escapó a la atmosfera[14-16] unos 1300-3200 PBq de ^{131}I , 260-290 PBq de ^{137}Cs y ^{133}Xe , y causó exposiciones a radiaciones ionizantes sobre la población. Además, hubo emisiones de diferentes radioyodos de vida corta ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I y de ^{132}Te , cuyas actividades fueron variando durante los primeros días dependiendo de su periodo de semidesintegración y de la meteorología. Hubo también emisión de partículas calientes que son fragmentos de combustible con productos de fisión, tales como cesio, yodo y rutenio dentro de una matriz de óxido de uranio. [16, 17].

Los aproximadamente 530000 trabajadores y soldados que intervinieron en la mitigación y limpieza de la central, se les denominó "liquidadores", recibieron una dosis media de 120 mSv, las dosis registradas variaron desde 10 mSv hasta más de 1000 mSv, aunque un 85 % estuvo entre 20 y 500 mSv. En los momentos posteriores al accidente[11, 14, 15], 237 trabajadores y bomberos tuvieron que ser hospitalizados de los cuales 134 recibieron dosis suficientemente altas como para causar el síndrome de irradiación aguda (SIA), 28 de ellos fallecieron pocos meses después. Durante el periodo 1987-2004 fallecieron otras 19 personas afectadas por el SIA. Entre los habitantes y trabajadores que recibieron mayores dosis hubo aumentos de casos de leucemias, en torno a 200 en población infantil y otros tantos en liquidadores. En estos últimos se está constatando un incremento de otros tipos de cánceres, de los que hasta 2009 se asociaba con 2422 muertes. Además, en los individuos que estuvieron expuestos por encima de 20 mSv parece que han aumentado los casos de enfermedades cardiovasculares, lesiones

graves en la piel y cataratas radioinducidas. No hay evidencias de malformaciones congénitas entre los nacidos tras el accidente.

Las dosis debidas a exposición interna fueron esencialmente por la incorporación de ^{131}I y otros radioyodos de vida corta durante los primeros días o semanas después del accidente y en un plazo más largo en el tiempo de ^{134}Cs y ^{137}Cs . La exposición interna[14, 17] debida a la radiación gamma fue relativamente uniforme sobre todos los órganos y tejidos del cuerpo, las principales contribuciones fueron de ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I y ^{140}Ba y ^{140}La para los evacuados, y ^{134}Cs y ^{137}Cs para los habitantes de áreas contaminadas que no fueron evacuados. En zonas más alejadas se contaminó el suelo y las plantas de ^{131}I y ^{137}Cs y pasó a la cadena alimentaria de los animales, y pronto en alimentos como las verduras y la leche. Por tanto, una parte de la población se contaminó por ingestión[14, 15]. Se realizaron 350000 medidas de ^{131}I en tiroides. La dosis estimada de ^{131}I debida a la ingestión fue de un 20 % más que la debida a la inhalación[18]. A través de la ingesta, se estima que afectó a casi 8000 niños y adolescentes que recibieron dosis absorbidas superiores a 5 Gy, y por encima de 1 Gy en 19300 personas en Bielorrusia y Ucrania. Hasta el año 2005 se diagnosticaron 6846 casos de cáncer de tiroides que podrían atribuirse a la ingestión del yodo radiactivo y 15 muertes entre los afectados de cáncer de tiroides.

Otras contaminaciones fueron de ^{90}Sr que fueron encontradas en la comida[14, 15, 18], y de transuránidos, tales como los emisores alfa ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu y ^{241}Am y los emisores beta como ^{241}Pu que se depositaron en el suelo, y fueron la causa de la inhalación de partículas radiactivas.

Como consecuencia del accidente[14, 15] fueron evacuadas 45000 personas en las primeras 48 h y 116000 durante el primer mes. En los años posteriores, 220000 personas fueron trasladadas de sus hogares para que se cumpliera el criterio de no superar el límite de dosis integrada en toda la vida de 350 mSv. A día de hoy, la mayor parte de la población no supera 1 mSv/ año y por tanto se considera que en las zonas habitadas la situación radiológica es aceptable.

Apenas ha habido retorno de la población[14]. En la actualidad, en la zona prohibida en torno a la central hay autorizados para vivir unos 1000 habitantes, sobre todo personas de edad avanzada. En el año 2011, se abrió la zona al turismo.

El impacto social y los daños psicológicos y sobre la salud mental son muy elevados entre la población. Fue clasificado en la escala INES nivel 7.

Tabla 1.2: Comparaciones de las estimaciones de una amplia gama de actividades (PBq) de radionucleidos liberados a la atmósfera en los accidentes de Fukushima y Chernobyl[19].

Radionucleido	Fukushima Daiichi A (PBq)	Chernobyl A (PBq)
<i>Gases nobles de fisión</i>		
Kr-85	6.4-32.6	33
Xe-133	6000-12000	6500
<i>Productos de fisión volátiles</i>		
Te-129m	3.3-12.2	240
Te-132	0.76-162	$\sim 1.15 \cdot 10^3$
131I	100-400	$\sim 1.76 \cdot 10^3$
I-133	0.68-300	2500
Cs-134	8.3-50	~ 47
Cs-136	–	36
Cs-137	7-20	~ 85
<i>Productos de fisión semi- y baja volatilidad</i>		
Sr-89	$4.3 \cdot 10^{-2}$ –13	~ 115
Sr-90	$3.3 \cdot 10^{-3}$ –0.14	~ 10
Ru-103	$7.5 \cdot 10^{-2}$ – $7.1 \cdot 10^{-5}$	>168
Ru-106	$2.1 \cdot 10^{-6}$	>73
Ba-140	1.1–20	240
<i>Elementos refractores</i>		
Zr-95	0.017	84
Mo-99	$8.8 \cdot 10^{-8}$	>72
Ce-141	0.018	84
Ce-144	0.011	~ 50
Np-239	0.076	400
Pu-238	$2.4 \cdot 10^{-6}$ – $1.9 \cdot 10^{-5}$	0.015
Pu-239	$4.1 \cdot 10^{-7}$ – $3.2 \cdot 10^{-6}$	0.013
Pu-240	$5.1 \cdot 10^{-7}$ – $3.2 \cdot 10^{-6}$	0.018
Pu-241	$3.3 \cdot 10^{-7}$ – $1.2 \cdot 10^{-3}$	~ 2.6
Cm-242	$9.8 \cdot 10^{-6}$ – 10^{-4}	~ 0.4

Fukushima se encuentra en la costa noreste de Japón. El accidente se produjo el 11 de marzo de 2011. Un maremoto posterior al gran terremoto que se produjo en Japón oriental con una magnitud de 9.0 en la escala de Richter fue la causa del accidente. El diseño de la central nuclear fue inadecuado para hacer frente a una ola de unos 15 m de altura, y cuyo muro de contención era de 5,5 m. Se inundaron los sistemas esenciales[11, 19, 20] de la central y se produjo una pérdida de refrigeración en tres reactores. Se emitieron a la atmósfera entre 100-400 PBq de ^{131}I , 7-20 PBq de ^{137}Cs , 6000-12000 PBq de ^{133}Xe , y el vertido al océano Pacífico fue de 10-20 PBq de ^{131}I , 1-6 PBq de ^{137}Cs . También se emitieron a la atmósfera cantidades variables de estroncio, rutenio, actínidos como el plutonio y gases nobles como el kriptón (ver Tabla 1.2). Se vieron afectadas por la contaminación por evacuación o confinamiento en el interior de sus viviendas aproximadamente 150000 personas durante los primeros días. Inicialmente, se evacuaron unas 78000 personas. Un mes posterior al accidente, se evacuaron a unas 10000 personas más. En la actualidad 81300 personas siguen desplazadas aunque se ha

autorizado el retorno en poblaciones de la zona suroeste, cuya tasa de dosis de radiación externa es inferior a 20 mSv/ año.

Durante el accidente 174 trabajadores recibieron dosis[19, 21, 22] por encima de 100 mSv, de los cuales 6 recibieron entre 309 y 678 mSv, 13 trabajadores recibieron dosis equivalente en el tiroides entre 2-12 Gy por inhalación de ¹³¹I.

En el tiroides se han estimado dosis equivalentes[19, 22] inferiores a 10 mSv en el 95,7% de los niños. No se produjeron fallecidos debido a la radiación. Las dosis recibidas por la población en general, registradas durante el primer año y las estimadas durante toda la vida, son bajas o muy bajas, y no se espera un aumento de la incidencia de los efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia.

Finalmente, estudios sobre la salud mental y la cultura japonesa confirman que la población afectada experimentó un gran sufrimiento y presentó síntomas de trastorno de estrés postraumático y otros problemas psicológicos.

En Europa se realizaron 710[23] medidas a extranjeros que estuvieron afectados por el accidente, en contadores de radiactividad corporal de todo el organismo y de tiroides. De las cuales 176 resultaron positivas, con las actividades que se exponen en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3: Actividades medidas de extranjeros afectados por el accidente de Fukushima en contadores de radiactividad corporal europeos

Radionucleido	Nº casos	Actividad (Bq)
<i>Todo el organismo</i>		
Cs-134	40	24-637
Cs-137	77	18-670
Te-132	26	24-744
<i>Tiroides</i>		
¹³¹ I	45	9-644
¹³² I	26	3-86

En el contador de radiactividad corporal del CIEMAT se midieron 8 personas afectadas por el accidente en Japón, todas ellas con resultados negativos.

Fue declarado en la escala INES nivel 7.

En España ha habido dos incidentes importantes en el ámbito de la industria nuclear:

El incidente de la central nuclear de **Vandellòs I** ocurrió en 1989[24], fue provocado por un incendio en el generador eléctrico debido a un fallo mecánico. De forma indirecta, este incendio provocó una inundación de agua de mar en la zona del reactor nuclear que

provocó la inoperatividad de algunos de los sistemas de seguridad. No se produjo escape de contaminación radiactiva al exterior ni en el emplazamiento, el núcleo del reactor tampoco resultó dañado. Fue clasificado en la escala INES con nivel 3.

El incidente que ocurrió en la central nuclear de **Ascó** el 28 de noviembre de 2007[25] no fue notificado al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) hasta el día 4 de abril de 2008. El origen fue un fallo en la ventilación del edificio de combustible que provocó un vertido en el exterior de partículas metálicas de activación. Se estimó que 84,95 MBq se emitieron al exterior. Se clasificó en la escala INES con nivel 2. El impacto radiológico fue muy poco significativo para la población del entorno de la central, recibiendo dosis por debajo de los límites legales. Se realizaron medidas a 2717 personas en el contador de radiactividad corporal (CRC). En el CRC del CIEMAT se midieron a 91 personas para la detección de posible ^{60}Co incorporado.

1.2.2. Medicina nuclear y producción de radiofármacos

En medicina nuclear han sido muy numerosos los accidentes[11] que ha habido en varios países a lo largo de la historia. La mayoría han sido relacionados con equipos de rayos X, equipos de radioterapia y aceleradores que por diferentes causas han irradiado inadecuadamente de forma externa a pacientes y trabajadores.

El uso de radiofármacos, cada día más frecuente en medicina nuclear, hace que la manipulación de radionucleidos sea habitual en hospitales, e instalaciones de producción. La mayoría de radionucleidos utilizados en medicina nuclear (ver Tabla 1.4) tienen periodos de semidesintegración cortos. Para uso diagnóstico[26], la emisión de energía debería ser detectada en una gammacámara, con una absorción mínima en los tejidos. Por el contrario, para uso terapéutico, la energía debe de ser depositada en el tejido. Por lo general, los radionucleidos que decaen con emisiones γ y β^+ son utilizados para imágenes y los que decaen con emisiones α y β^- son usados para propósitos terapéuticos. Las actividades manipuladas son muy altas, pero en general, tienen periodos de semidesintegración cortos y el decaimiento de la actividad es muy rápido. Por tanto, el riesgo de altas dosis en este tipo de radionucleidos es bajo.

La producción en generadores y ciclotrones hace que este tipo de instalaciones tengan también riesgo de incidente y/o accidente radiológico.

En España se produjo un accidente en la instalación de producción $^{99\text{m}}\text{Tc}$ de **Medgenix** en Tres Cantos (Madrid) el día 27 de marzo de 1992. En el momento del accidente[27] los trabajadores estaban manipulando una fuente de ^{99}Mo , e inhalaban aerosol radiactivo

que contenía ^{99}Mo y $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Los trabajadores implicados se les realizaron medidas *in vivo* en el CRC del Ciemat desde el mismo día de la incorporación, así como medidas *in vitro* para la determinación de estos radionucleidos en orina.

Tabla 1.4: Radionucleidos más comunes utilizados en medicina nuclear. Fuente ISO 16637[26].

Radionucleidos	Vida media ⁱ	Emisiones principales
C-11	20.39 m	β^+ , γ ⁱⁱ
O-15	122.24 s	β^+ , γ ⁱⁱ
F-18	109.77 m	e^- , β^+ , γ ⁱⁱ
Ga-67	3.26 d	e^- , X, γ
Ga-68	67.71 m	β^+ , γ ⁱⁱ , γ
Sr-89	50.53 d	β^- , γ
Y-90	64.10 h	β^-
Tc-99m	6.02 h	e^- , X, γ
In-111	2.80 d	e^- , X, γ
I-123	13.27 h	e^- , X, γ
^{131}I	8.02 d	e^- , β^- , X, γ
Sm-153	46.50 h	e^- , β^- , X, γ
Er-169	9.40 d	β^- , γ
Lu-177	6.65 d	β^- , γ
Re-186	3.72 d	e^- , β^- , X, γ
Re-188	17.00 h	e^- , β^- , X, γ
Tl-201	72.91 h	e^- , X, γ
Ra-223	11.43 d	α , β^- , X, γ

ⁱ de acuerdo con la ICRP 107[28]

ⁱⁱ Aniquilación de fotones, se ven en la emisión energética de 511 keV

1.2.3. Fabricación del elemento combustible y reprocesado de combustible gastado

La fabricación del elemento combustible se produce a partir del uranio, (de símbolo químico U) y número atómico 92. Es el elemento más pesado que se encuentra en la naturaleza. Se suele encontrar en forma de óxido, siendo el más estable el U_3O_8 . El uranio en estado natural es una mezcla de tres isótopos radiactivos[29]: ^{234}U (0,02 % en masa), ^{235}U (0,7 %) y ^{238}U (99,28 %).

Las etapas para la obtención del combustible nuclear son, para la primera parte del ciclo, dependiendo de la naturaleza del reactor:

- 1.- Fase de explotación y minería para extraer el uranio para producir un polvo seco formado por uranio natural en forma de óxido de uranio, U_3O_8 .
- 2.- Fase de conversión de óxido de uranio (U_3O_8) a hexafluoruro de uranio (UF_6).

3.- Enriquecimiento. El UF_6 natural debe ser enriquecido en el isótopo fisionable para que se pueda utilizar como combustible nuclear. Para un reactor los niveles de enriquecimiento del uranio son de 3.5- 5 % de ^{235}U .

4.- Para usarlo como combustible nuclear, el UF_6 enriquecido se convierte en polvo de dióxido de uranio (UO_2), y se compacta en forma de pastillas

5.- Fabricación de elementos combustibles. Ensamblando barras metálicas e introduciendo en su interior las pastillas.

La segunda parte del ciclo corresponde a la recarga, que consiste sustituir parte de los elementos por combustible nuevo. El combustible nuclear puede ser reprocesado para un nuevo uso, o no ser reutilizado y ser gestionado como residuo de alta actividad.

Los accidentes más importantes en plantas de reprocesado ocurrieron en Mayak y Tokaimura. En cuanto a Europa hay dos plantas de reprocesado: Sellafield en Reino Unido y La Hague en Francia.

Mayak está situado en Rusia junto a los Montes Urales. Es una instalación que contiene varias zonas: central nuclear, área de investigación nuclear y reprocesamiento de elemento combustible. Allí se han producido varios accidentes[11] con riesgo radiológico para trabajadores, con dosis muy elevadas y como consecuencia hubo varios fallecidos y trabajadores con síndrome de irradiación aguda (SIA). Uno de los accidentes más graves ocurrió en 1957 en la instalación de investigación nuclear. Por un defecto de diseño se acumuló oxalato de uranio en una caja de guantes y como consecuencia 6 personas recibieron dosis de 3-30 Gy, una falleció y las otras 5 tuvieron síndrome de irradiación aguda (SIA). Fue clasificado en la escala INES con nivel 6.

Tokaimura está situado a 130 km al noreste de Tokio, Japón, es una planta de conversión de combustible dedicada al procesamiento de combustible enriquecido. En 1999 se produjo un accidente[11] en el que se vertieron sin autorización a un tanque de precipitación 16,6 kg de uranio enriquecido al 18.8%. Tres trabajadores estuvieron expuestos, recibiendo dosis absorbidas de 10-20 Gy, 6-10 Gy y 1,2-5,5 Gy. Los dos primeros fallecieron en los 83 y 211 días siguientes después del accidente. Se evacuaron a 200 residentes en un radio de 350 m y miembros del público recibieron una dosis efectiva de hasta 5 mSv. Se clasificaron en la escala INES como nivel 4.

Sellafield-Windscale se encuentra en el centro-oeste de Reino Unido es un centro de reprocesado de combustible gastado. Allí han tenido lugar varios accidentes[30] e incidentes en los que se han derramado efluentes radiactivos a la atmosfera y al mar

debidos a diversas causas. En 1973, una reacción exotérmica tuvo lugar entre productos de fisión insolubles a alta temperatura que contenían grandes cantidades de rutenio, zirconio y otros sólidos. Las muestras de aire tomadas indicaron que se había producido una liberación de ^{106}Ru a la atmósfera de aproximadamente 370 GBq. Como consecuencia 35 personas estaban contaminadas. Las cantidades inhaladas se midieron en un contador de cuerpo entero para los 35 hombres. Uno de ellos tenía hasta 1.5 MBq en sus pulmones con una dosis comprometida en 50 años de aproximadamente 10 Sv.

La Hague es un complejo nuclear con dos plantas de reprocesado situado en la costa de Normandía (Francia). Se inició como uso militar de almacenamiento y fabricación de bombas de plutonio, posteriormente empezó a tener uso civil, y empezó a reprocesar combustible nuclear gastado de diferentes países, actualmente es el mayor separador de plutonio del mundo. Han sido numerosos los incidentes que ha sufrido esta instalación, por diferentes causas se han derramado tanques con altos niveles de radiactividad en el suelo, mar y aire, contaminando con radionucleidos de vida larga tales como ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am y Pu, diferentes zonas medioambientales, aumentando las tasas de dosis en dichas zonas. En el año 2009 un trabajador fue contaminado[31] durante una operación de eliminación de polvo de una celda. Se pinchó y perforó sus guantes de la mano derecha con un alambre en el taller de media actividad de uranio. Los controles realizados revelaron una contaminación interna de radiación alfa, debida al uranio. La estimación de dosis efectiva a los 50 años fue de más de 5 mSv. Fue declarado en la escala INES como nivel 1.

1.2.4. Armamento nuclear y terrorismo

Desde la II Guerra Mundial (1945) algunos países han desarrollado armamento y pruebas nucleares poniendo en riesgo a gran parte de la población. También han sucedido actos de terrorismo que han afectado al público.

Semipalatinsk está ubicado en el noreste de la República de Kazakstán. Fue una zona utilizada por la antigua Unión Soviética (URSS) para realizar sus pruebas con armamento nuclear. Se realizaron 456 pruebas[32], de los cuales 116 fueron en la atmósfera y 340 ocurrieron en el subsuelo durante los años 1947-1989. Las explosiones del armamento nuclear tenían como consecuencia exposición principalmente debida a los radionucleidos tales como ^{90}Sr , ^{137}Cs y ^{239}Pu y ^{240}Pu para una población de entre 500000 y un millón de personas.

La mayoría de la exposición a la radiación fue debida a los radionucleidos de vida corta (se estima 95 %). El fondo radiactivo se incrementó a 3 mSv/año[32] debido a la

contaminación de la superficie. Los tests nucleares en la atmósfera, ocurridos en septiembre de 1949 y de 1951, en agosto de 1953, en marzo y agosto de 1956, contribuyeron a incrementar en más del 85 % la dosis en la población cercana al emplazamiento. Sin embargo, había una gran heterogeneidad en las exposiciones dependiendo del lugar, lo que supone una gran incertidumbre en las exposiciones individuales. Aproximadamente un 10 % del total de la dosis se atribuyó a dosis por exposición interna debido a la ingestión de los radionucleidos después de las explosiones. Siete radionucleidos artificiales fueron detectados, ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{58}Co y ^{60}Co . La dosis por exposición externa estimada para la población estaba por debajo del límite anual de dosis 1 mSv/año.

Fue en 1956 cuando la Unión Soviética empezó a realizar estudios[32, 33] a los residentes locales ya que la exposición en la población hizo que 638 personas fueran hospitalizadas debido al síndrome de irradiación aguda. En las primeras cuatro décadas de ensayos nucleares no se realizaron de forma individual medidas directas a miembros de la población sobrepuestos y no se les realizó bioensayos ni dosimetría retrospectiva. El primer estudio de contaminación interna fue realizado en 1995 en un contador de radiactividad corporal. Se midieron 765 personas de la población que vivían en dos pueblos Mostik y Maisk y no detectaron contaminación de ^{137}Cs . Las medidas *in vitro* revelaron niveles significativos de ^{90}Sr en orina. No se detectaron la incorporación de otros radionucleidos tales como ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{234}U y ^{238}U .

Se incrementaron las malformaciones congénitas en los nacimientos y la mortalidad infantil sobre los años 60. Hasta el año 1990 se incrementaron las incidencias[34] de todos los cánceres en niños incluyendo leucemia y tumores cerebrales. Un estudio de 1997 de varios pueblos vecinos a Semipalaninsk mostraron que el índice de mortalidad por cáncer casi se había cuadruplicado con respecto a 1975, la mayoría debido a cánceres gastrointestinales. En los años 80 se observó un incremento de cánceres de mama y del aparato respiratorio. El riesgo de leucemia en la población con alta exposición a la radiación y los índices de anormalidades cromosómicas fueron estudiadas con mayores incidencias que el rango normal.

Un caso de terrorismo puede considerarse el envenenamiento de **Alexander Litvinenko**, que ocurrió[11, 35] el 23 de noviembre de 2006 cuyo fallecimiento se produjo poco después debido a la ingestión el 1 de noviembre de ^{210}Po , emisor de partículas alfa. La incorporación estimada fue de alrededor de 4 GBq resultando dosis absorbidas entre 20 Gy y 100Gy. Algunos lugares de la ciudad resultaron contaminados como hospitales,

hoteles, oficinas, restaurantes, bares y medios de transporte. El riesgo para la salud pública generó gran preocupación en la población.

Se procesaron y evaluaron muestras de orina de 752 personas residentes en Reino Unido y de 664 personas de 52 países. Del primer grupo, 17 personas tuvieron dosis superiores a 6 mSv, 36 personas registraron dosis entre 1-6 mSv y 86 tuvieron dosis menor de 1 mSv. Del grupo de extranjeros ninguno recibió dosis superiores a 6 mSv.

1.2.5. Transporte de material radiactivo

El medio de transporte utilizado para material radiactivo tiene que estar adaptado con los blindajes y medios adecuados para que los trabajadores expuestos minimicen sus riesgos de irradiación y con un embalaje lo suficientemente fuerte y encapsulado para que si sufren un accidente se minimicen los riesgos evitando al máximo posible la emisión al exterior de material radiactivo.

Los accidentes más importantes[11] que ha habido en este ámbito han sido en submarinos nucleares, buques, aviones y artefactos espaciales. En estos casos, la mayoría son de actuaciones militares durante la guerra fría entre URSS y Estados Unidos.

Estados Unidos tuvo tres accidentes con aeronaves desde los años 1965-1967, en Okinawa (Japón), Palomares (España) y Groenlandia (Dinamarca). Llevaban armamento nuclear con bombas de plutonio. En todos los casos cayeron bombas al mar, o a la superficie terrestre.

Palomares[36] se encuentra en la costa de la provincia de Almería, al sureste de España. En 17 de enero de 1966, dos aviones del ejército de Estados Unidos chocaron en el aire, un bombardero y un avión petrolero, mientras el primero estaba repostando en el aire a 9450 metros de altura sobre la villa de Palomares. Como resultado del accidente cayeron cuatro bombas nucleares de plutonio. Ninguna de las bombas explotaron, sin embargo, dos de ellas detonaron con su impacto en el suelo. La cantidad de plutonio que se liberó contaminó una gran extensión de terreno en Palomares. Las otras dos bombas quedaron intactas, una se encontró en el lecho del río y la otra en el mar. Durante el accidente, 7 soldados norteamericanos murieron, pero nadie de la población española sufrió ningún daño. Se estableció un programa de vigilancia radiológica de la población potencialmente afectada y el análisis del suelo animales y vegetación, que fue gestionado por la Junta de Energía Nuclear (JEN), actualmente Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). En total, unas 40 ha de terreno

siguen aún afectadas por contaminación en diferentes niveles de concentración. La vigilancia radiológica de la población aún continua con revisiones médicas a unas 150 personas al año, y análisis de orina para determinar los niveles de actividad de $^{239+240}\text{Pu}$ y ^{241}Am . El número de análisis de plutonio en orina hasta el año 2010 fue de 4860, de 1096 personas.

1.2.6. Residuos, instalaciones abandonadas y fuentes huérfanas

El accidente más grave ocurrido en relación a instalaciones abandonadas[11] tuvo lugar en Goiânia (Brasil). **Goiânia** tiene 1000000 de habitantes, y está en el estado de Goiás en Brasil. En 1985 se cerró un centro médico privado en el que había una unidad de radioterapia con una fuente de ^{137}Cs de 50,9 TBq que quedó abandonada. Dos personas entraron en el edificio, retiraron el cabezal de la máquina donde se encontraba la fuente y se la llevaron a casa. Al desmontarla rompieron la cápsula. Posteriormente, vendieron el conjunto a un chatarrero, quien observó que el material emitía un resplandor azul en la oscuridad. Varias personas acudieron a observarlo y los fragmentos de la fuente se distribuyeron entre varias familias, lo que provocó irradiación externa e ingestión de sal de cloruro de cesio. Esta situación, durante 5 días, supuso una exposición grave a las personas que presentaron síntomas como náuseas, vómitos y lesiones en la piel. Dos semanas más tarde una persona llevó al médico el fragmento de la fuente. El físico médico y el médico midieron la fuente y consideraron que debía procederse a la evacuación inmediata de algunas personas, pero las medidas de emergencia no se adoptaron hasta 5 días más tarde, puesto que todos los recursos se encontraban en Rio de Janeiro y Sao Paulo, a 1500 km de distancia. En total 110000 personas se sometieron a medidas de contaminación externa e interna, confirmándose la contaminación en 249 de los casos. Las personas que sufrieron contaminación externa fueron descontaminadas, pero 129 sufrieron contaminación interna, 79 con dosis bajas en cuerpo entero. Las 50 personas restantes requirieron estrecha vigilancia médica: 30 quedaron en observación médica en la unidad de atención primaria y las otras 20 fueron hospitalizadas. Durante el mes posterior al suceso, cuatro personas murieron por complicaciones del síndrome de irradiación agudo, se estimó que recibieron una dosis media por exposición interna de 2,3 Sv.

Con respecto a España, el caso más grave ocurrió en la industria de **Acerinox** que está situada en el **Campo de Gibraltar** (Cádiz) el 30 de Mayo de 1997. Se produjo la fusión[37] de una fuente de ^{137}Cs que estaba con su blindaje y por eso no se detectó a través de los pórticos que estas instalaciones poseen. Como consecuencia se emitió a la atmósfera ya que se detectó en diferentes zonas que se dispone de equipos de vigilancia

radiológica ambiental. Además, 21 trabajadores se tuvieron que someter a exámenes en el CRC del CIEMAT.

1.3. Medidas que se toman en un accidente nuclear

Las medidas de protección son las acciones encaminadas a evitar o atenuar las consecuencias sobre la salud de la población afectada y de los trabajadores que intervienen en la emergencia en caso de un accidente nuclear o radiológico. Las medidas de protección adoptadas dependen de la naturaleza de la radiación, del tipo de exposición a la radiación, externa y/o interna, del lugar donde se encuentra la contaminación, aire, superficies, suelo, plantas, alimentos, etc.

Las medidas[2, 11, 38] pueden aplicarse dependiendo de la urgencia y el tiempo de duración:

- Las **medidas urgentes** son acciones de protección que se adoptan de forma rápida para que las consecuencias del accidente sean mínimas.
 - El **confinamiento** consiste en que la población permanezca en sus domicilios o en edificios próximos donde estén cuando se ha anunciado la medida. El objetivo es evitar la exposición externa originado por la nube radiactiva y por el material depositado en el suelo, y la exposición interna por inhalación de las sustancias radiactivas.
 - La **profilaxis radiológica** consiste en la ingestión de compuestos químicos estables que tienen efecto reductor sobre la absorción de ciertos radionucleidos por determinados órganos, por ejemplo tomar yoduro de potasio (KI) reduce la absorción del yodo radiactivo por la glándula tiroides[39]. Hay que tomarlo antes de incorporar el yodo radiactivo o si no es posible, cuanto antes. La **evacuación** consiste en el traslado de la población afectada por el paso de la nube radiactiva, reuniéndola y albergándola en lugares apropiados no expuestos, durante un periodo corto de tiempo.
 - El **control de accesos** consiste en mecanismos de control en los accesos a zonas afectadas por una emergencia radiológica, permite disminuir la dosis colectiva, reducir la propagación de la contaminación y vigilar y controlar las dosis recibidas por el personal que entra y sale en la zona controlada.
 - La **protección personal** es el conjunto de actuaciones y medidas realizadas con el fin de evitar o disminuir la contaminación superficial o la inhalación de partículas

dispersas en el aire, por ejemplo el uso de prendas en todo el cuerpo y taparse boca y nariz con una prenda, tapar rendijas y ventilación de los edificios. Para los trabajadores que intervienen en la emergencia usar equipos de respiración, vestimenta especial y equipos de medida de la radiación.

- La **estabulación de animales** consiste en confinar y controlar los alimentos de los animales para que la contaminación no entre en la cadena alimentaria, y evitar así la propagación de la contaminación.
- La **descontaminación personal** y asistencia sanitaria es necesaria para personas contaminadas, su objetivo es evitar dosis debido al depósito de contaminación radiactiva, evitar la propagación y dispersión de la contaminación.
- Las medidas de **larga duración** se prolongan en el tiempo y tienen la finalidad de reducir el riesgo de los efectos estocásticos en la salud de la población expuesta y de los hereditarios en las próximas generaciones.
 - El **control de alimentos** y agua como carácter preventivo, para evitar la ingestión de material radiactivo que está en la cadena alimenticia.
 - La **descontaminación** de áreas consiste en la limpieza de las zonas contaminadas para reducir la irradiación externa de la contaminación radiactiva depositada en superficies así como la resuspensión y dispersión de la misma, y reducir la transmisión de la contaminación radiactiva a los animales, alimentos y personas.
 - El **traslado temporal** (albergue de media duración) evita que las personas afectadas reciban dosis elevadas en un periodo de meses. Depende de los niveles de contaminación que haya en su lugar de residencia y de la previsión de estos dependiendo del proceso natural, meteorología y arrastre de las aguas y del viento. Este tipo de traslado depende también de factores económicos y sociales.
 - El **traslado permanente** (realojamiento) evita que las personas afectadas reciban dosis elevadas a lo largo de su vida. Supone el realojo permanente de su vivienda debido a los niveles de contaminación de su lugar de residencia que supone recibir una dosis alta a lo largo de la vida. Dependen de factores económicos y sociales.

- La **información a la población** afectada se debe de transmitir de forma previa, para que sepan en qué consisten las medidas a tomar en caso de emergencia e informar lo más rápido posible en una situación de emergencia.

Capítulo 2: Determinación de la exposición interna en escenarios de emergencia radiológica y nuclear

2.1. Introducción. Contaminación en el organismo humano

La dosimetría de las radiaciones ionizantes se utiliza en el campo de la protección radiológica para comprobar que las limitaciones de dosis se cumplen para trabajadores expuestos y público en general, con el fin de preservar la salud de las personas y asegurar que se cumple la normativa legal.

La exposición a las radiaciones puede ser externa cuando la fuente irradia desde el exterior del organismo e interna cuando las fuentes se han incorporado al organismo, de modo que la irradiación se produce desde el interior del organismo. La dosimetría interna tiene como objetivo la estimación de la dosis efectiva comprometida, E(50) (adultos) o E(70) (niños), en Sieverts [Sv], resultante de la incorporación al organismo de sustancias radiactivas. Las medidas de actividad retenida o excretada por el organismo de la persona contaminada son los datos primarios necesarios para la estimación de la dosis por exposición interna. Además es necesario disponer de información adicional sobre las circunstancias de la incorporación (instante en el que se produce, radionucleido, forma química del contaminante, tamaño de las partículas para el caso de inhalación de aerosoles radiactivos) y el comportamiento biocinético del radionucleido, para determinar la incorporación a partir de las medidas experimentales.

Las vías de incorporación son:

- **Directas a sangre y/o linfa**, que son los órganos de transferencia de la contaminación por todo el organismo: a través de la piel, por heridas o lesiones y por inyección de sustancias radiactivas (por ejemplo, radiofármacos).
- **Indirectas hasta los órganos de transferencia**: a través de la inhalación, donde la contaminación se introduce por las vías respiratorias, o por ingestión (por ejemplo de alimentos y agua contaminados), incorporados a través del aparato digestivo.

Las fases iniciales de la exposición interna son **incorporación** (por inhalación, ingestión, heridas o inyección), **depósito**, (en vías de entrada como pulmón, aparato digestivo, piel) y **absorción** (transferencia del material radiactivo a los líquidos extracelulares (sangre y linfa). En el caso de la inhalación dependiendo de la solubilidad del compuesto químico del contaminante la absorción puede ser *tipo F* (Fast), absorción rápida, se absorbe el 100 % en 10 minutos, *tipo M* (Moderate), absorción moderada, se absorbe el 10 % en 10

minutos y el 90 % en 140 días y *tipo S* (Slow), absorción lenta, el 0.1 % es absorbido en sangre en 10 minutos y el 99.9 % en 7000 días. Durante la **distribución** del material radiactivo por el cuerpo a través de la sangre y la linfa, el radionucleido tiene afinidad por un tejido u órgano en el que permanece retenido de forma preferencial (órgano crítico o diana). Finalmente se produce la **excreción** del material radiactivo por eliminación a través de la orina y heces.

La determinación de la exposición interna requiere conocer los factores específicos de cada radionucleido contaminante tales como la naturaleza de la radiación (α , β , γ), el periodo de semidesintegración radiactivo ($T_{1/2} = \ln 2 / \lambda_R$), y el periodo biológico ($T_B = \ln 2 / \lambda_B$), que indica el tiempo necesario para que sea eliminado la mitad del radioisótopo fijado en el órgano diana, a través de procesos biológicos, donde λ_R y λ_B son las constantes de semidesinteracción radiactiva y biológica respectivamente. El periodo efectivo es por tanto $T_{ef} = T_B \cdot T_R / (T_B + T_R)$. Además hay que tener en cuenta las características del compuesto químico incorporado tales como la forma física y química del material. Según sea la composición química, tendrá un comportamiento en el organismo distinto. El tamaño de las partículas contaminantes se debe tener en cuenta cuando la incorporación es por inhalación. El comportamiento metabólico del material radiactivo dentro del cuerpo se describe a través de modelos biocinéticos, dependiendo de la vía de incorporación.

La publicación ICRP 66[40] describe el comportamiento biocinético de material inhalado a través del modelo del tracto respiratorio humano (HRTM) (ver Figura 2.1). Distingue dos compartimentos principales: el extra-torácico (ET) y las vías torácicas (TH). Los principales procesos de caracterización de la biocinética de los radionucleidos en el tracto respiratorio son el depósito, el transporte y la absorción.

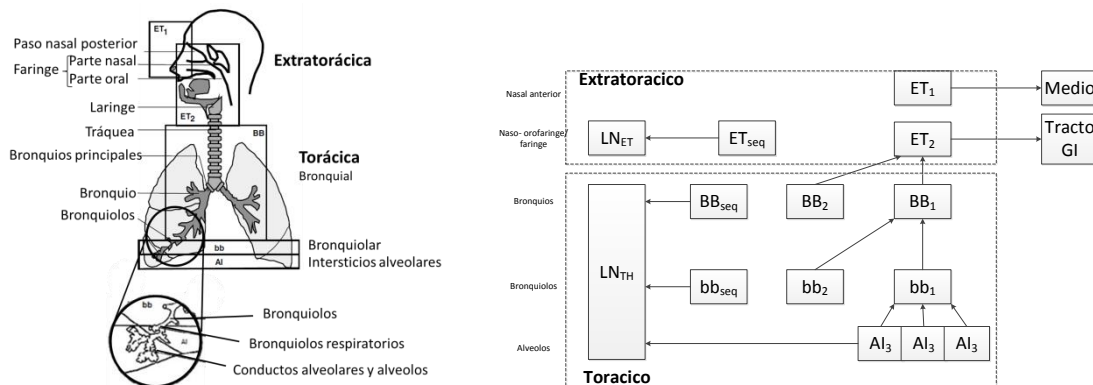


Figura 2.1: Esquema del modelo inhalación de ICRP 66. Distingue la zona extratorácica y torácica.

El Diámetro Aerodinámico de la Mediana de Actividad (AMAD) es utilizado para caracterizar los tamaños de las partículas de los aerosoles incorporados. Este tamaño tiene un rango de 0.6 nm-100 µm. Para exposiciones en trabajadores expuestos (TE) se considera AMAD de 5 µm y para público 1 µm, salvo que se tenga información específica de este parámetro.

El comportamiento biocinético de la ingestión esta descrito en la publicación ICRP 30[41] y actualizado en la publicación ICRP 100[42] (modelo tracto alimentario humano, HATM). El HATM considera que el tránsito del material radiactivo ingerido se produce en seis regiones del tracto alimentario: cavidad oral, el esófago estómago, intestino delgado, intestino grueso superior e intestino grueso inferior (ver Figura 2.2).

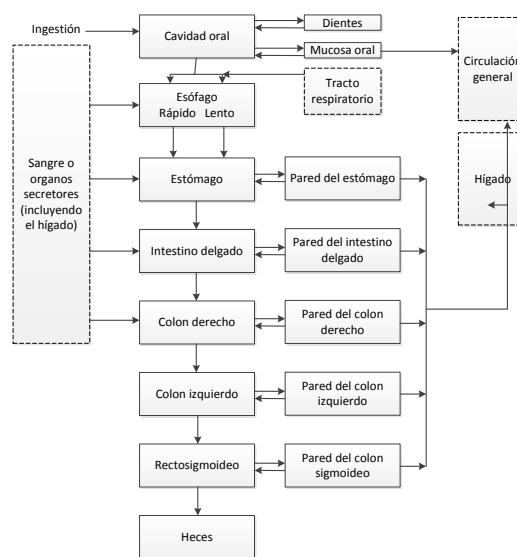


Figura 2.2: Modelo del tracto alimentario humano según publicación ICRP 100.

Además del riesgo de inhalación e ingestión, en los lugares de trabajo se pueden provocar heridas a consecuencia de un incidente en la instalación radiactiva o nuclear. El material puede permanecer retenido en la herida, el material soluble se puede transferir a la sangre y por tanto a otras partes del cuerpo y el material insoluble puede llegar al tejido linfático donde se disuelve gradualmente hasta que pasa a sangre. El National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) de Estados Unidos desarrolló el modelo biocinético de heridas, en la publicación NCRP 156[43]. Es un modelo compartimental que clasifica el material de la herida en 7 compartimentos dependiendo de la categoría de la contaminación, de más soluble a menos soluble: fragmentos, partículas, agregados y estado ligado (PABS), partículas atrapadas y agregadas (TPA), coloides y estado intermedio (CIS), soluble, ganglios linfáticos y sangre (ver Figura 2.3). La categoría de soluble se refiere a radionucleidos que están inicialmente en la solución y son inyectados subcutáneamente o por vía intramuscular y entran directamente a la sangre.

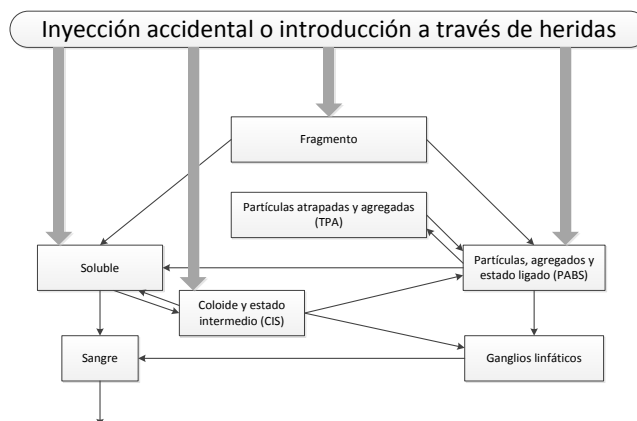


Figura 2.3: Esquema del modelo biocinético de material radiactivo depositado en heridas de NCRP 156.

2.2. Las técnicas de medida para la determinación de la exposición interna

Los métodos de medida utilizados para la vigilancia de personas expuestas a la incorporación de radionucleidos al organismo [44, 45] son los métodos *in vitro* que se realizan en los laboratorios de bioeliminación (BIO) por análisis de excretas, y los métodos *in vivo*, que se realizan en los Contadores de Radiactividad Corporal (CRC). La elección del método está determinada principalmente por la radiación emitida por el contaminante, el comportamiento biocinético y la sensibilidad de las técnicas de medida.

Técnicas *in vitro*: Son técnicas que tratan de detectar la presencia de radionucleidos analizando excretas de la persona con riesgo de exposición interna. Las muestras más habituales son de orina y heces. Las técnicas *in vitro* se utilizan para determinar la concentración de actividad [Bq/l, Bq/d] en la muestra analizada.

Las técnicas utilizadas para emisores α son Espectrometría alfa, Espectrometría de Masas ICP-MS, Fosforimetría Cinética (KPA) y Fluorimetría. La técnica más utilizada para emisores β es Espectrometría de centelleo en fase líquida (LSC). La técnica utilizada para emisores γ es la Espectrometría γ .

Técnicas *in vivo*: Se emplean para la medida directa de la actividad [Bq] de los radionucleidos incorporados en el organismo y retenidos dentro del cuerpo. Es una técnica rápida (5-60 minutos). Son útiles para medir la actividad de radionucleidos emisores de RX y radiación γ . Este tipo de radiación es penetrante y es capaz de salir al exterior desde el interior del organismo y ser detectada colocando detectores en la zona exterior del cuerpo. Se realizan en un Contador de Radiactividad Corporal (CRC) donde los detectores tienen un blindaje exterior para reducir el fondo radiactivo. Los sistemas de detección[46] más habituales son:

Contador de centelleo sólido: Consiste en detectores de material NaI(Tl) que se utiliza para determinar contaminantes con rangos de energía superiores a los 100 keV en todo el organismo o en órganos concretos. Tienen la propiedad de tener buena eficiencia de detección pero no tienen buena resolución energética. Trabajan a temperatura ambiente.

Sistema de detector de semiconductor: Consisten en detectores de germanio, suelen ser de alta pureza (HPGe), que necesitan trabajar a bajas temperaturas y que se utilizan para determinar radionucleidos con emisiones energéticas bajas o bien con contaminaciones complejas puesto que tienen una excelente resolución, aunque peor eficiencia que los detectores tipo NaI (TI). Operan a temperaturas bajas que requieren refrigeración a 77 K.

Los detectores de **bromuro de lantano** (LaBr₃(Ce)) son detectores de nueva generación. Se trata de centelleadores inorgánicos para espectrometría γ , con una resolución en energía y estabilidad mejor que los detectores Na(Tl). La principal ventaja de estos detectores es que trabajan a temperatura ambiental, pero aún el tamaño del cristal es pequeño y su eficiencia es baja.

La reducción del fondo es importante para mejorar la sensibilidad de los sistemas de detección, con materiales que estén libres de contaminación tales como acero, plomo y cobre.

La determinación de la contaminación radiactiva depositada en el organismo se realiza a través de medidas, que dependen, sobre todo del órgano en el que permanece retenido el radionucleido.

Para medir la actividad de radionucleidos que emiten fotones (RX y R γ) en cuerpo entero, en órganos y tejidos distribuidos por todo el organismo, se emplean detectores de centelleo tipo NaI(Tl) y/o detectores de semiconductor tipo HPGe en una geometría adecuada para medir productos de activación y fisión. La principal ventaja de los detectores NaI(Tl) es su alta eficiencia y los tiempos de medida son cortos, con buena sensibilidad de detección. En el caso de los detectores HPGe son de alta resolución energética que permite asegurar la identificación de los radionucleidos en el análisis de espectros complejos.

La geometría de medida depende de la zona donde se deposita el radionucleido. En el caso del yodo una parte del material incorporado que no es excretado tiende a quedar retenido en el tiroides. Cuando se produce la inhalación de radionucleidos en un

compuesto químico tipo insoluble (por ejemplo óxidos de uranio) es adecuado medir en pulmón, por la larga duración de la retención pulmonar y el lento paso a sangre. Los cobaltos y cesios radiactivos se miden en todo el cuerpo. Si la incorporación es a través de una herida, la medida es adecuada realizarla sobre la parte de la piel dañada.

Las técnicas de medida que se han de utilizar en caso de emergencia son diferentes dependiendo, entre otros parámetros, de los radionucleidos contaminantes.

Actínidos (plutonio, americio, uranio)

Los actínidos, generalmente tienen alta radiotoxicidad y la sensibilidad de los detectores debe ser adecuada para la vigilancia de personas expuestas. Son típicamente emisores de radiación alfa.

La baja energía de los fotones emitidos, la baja intensidad de emisión y la atenuación de los tejidos internos (grasa, músculo, hueso) reduce de forma significativa la eficiencia de detección gamma. En el caso de las medidas de actínidos en pulmón, el espesor torácico debe tenerse en cuenta en las calibraciones, para distinguir la atenuación fotónica desde los pulmones, donde están depositados los radionucleidos, hasta alcanzar al detector.

Plutonio: La medida directa en pulmones está basada en la detección de las emisiones de rayos X en 13,6 keV, 17,1 keV y 20,3 keV del ^{239}Pu . Los fotones de tan baja energía están altamente atenuados por los tejidos de la zona torácica, de grasa y músculo, y están casi completamente absorbidos por el hueso. La alta atenuación y la intensidad de emisión baja hacen que los límites de detección de la actividad medible en los pulmones correspondan a grandes incorporaciones. Únicamente esta técnica de medida sería aplicable a casos de emergencia.

Americio: Materiales incorporados con plutonio suelen contener ^{241}Am , que se presenta por ejemplo, debido al decaimiento del ^{241}Pu . El índice de actividad del ^{239}Pu con el ^{241}Am es a menudo conocido, en esos casos se puede medir la actividad del ^{241}Am y relacionarlo con la del ^{239}Pu . El ^{241}Am tiene una emisión γ en 59,5 keV con una intensidad de emisión del 36 %. Al ser una emisión de energía más alta está menos atenuada por el cuerpo que el plutonio, por tanto es más fácil de detectar en pulmones, hueso e hígado y permite determinar la actividad del plutonio si se conoce el índice de composición isotópica conocido del Pu:Am.

Uranio: Generalmente la incorporación de uranio contiene una mezcla de los isótopos ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U . En el enriquecimiento de uranio, el contenido del ^{235}U es elevado y en el empobrecimiento es reducido comparado con su proporción en el uranio natural. La

principal emisión energética gamma del ^{235}U es 185.7 keV (intensidad 57,2 %). El ^{238}U es un emisor α , pero se pueden detectar los picos del 63.3 keV y 92.5 keV de su hijo radiactivo, el ^{234}Th . Si no existe separación química o física es frecuente el equilibrio secular y permitiría determinar la actividad del ^{238}U . Las composiciones isotópicas del uranio natural, empobrecido y enriquecido se muestran en la tabla Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Composiciones isotópicas de uranio natural, uranio empobrecido y Uranio enriquecido, obtenido de la norma ISO 16638-1: "Radiological protection- Monitoring and internal dosimetry for specific material- Part 1: Uranium"

	U natural (%)	U empobrecido (%)	U enriquecido (%)
^{238}U	99.275	99.799	96.471
^{235}U	0.72	0.2	3.5
^{234}U	0.0055	0.0010	0.02884

Radioyodos: El ^{131}I es uno de los isótopos más importante desde el punto de vista de la protección radiológica puesto que se produce en centrales nucleares y se utiliza en medicina nuclear. El ^{131}I se puede medir utilizando un detector NaI(Tl) que tiene alta eficiencia en tiempos cortos y, o con un detector de HPGe (por su alta resolución) en caso de tratarse de una contaminación compleja de varios isótopos de yodo ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I . En el caso del ^{125}I sus emisiones energéticas son muy bajas, alrededor de 35 keV por tanto es recomendable medir con el detector HPGe.

Materiales radiactivos naturales (NORM)

Se encuentran en el medioambiente de forma natural. En caso de incorporación, lo habitual es su evaluación de dosis a partir de métodos *in vitro*, pero pueden ser medidos también con técnicas *in vivo* para la evaluación de exposiciones de la cadena radiactiva del uranio y torio. El ^{226}Ra es parte de la cadena de ^{238}U , y se deposita en hueso, decae al ^{222}Rn , que es gas y la vía de entrada en el cuerpo es, principalmente, por inhalación. El ^{210}Pb tiene una emisión gamma en 46.5 keV con intensidad de 4.6% y se deposita en el esqueleto durante mucho tiempo. En el caso de exposición interna en minería de uranio se puede utilizar como indicador de la incorporación de gas radón.

La exposición de torio puede ocurrir en industrias de minería y gas. La actividad del torio se puede cuantificar midiendo sus descendientes y considerando equilibrio secular. El ^{232}Th se puede determinar a partir de la media del ^{228}Ac (911 keV, 26.2 %). El ^{228}Th se puede determinar a partir de la medida del ^{224}Ra , ^{212}Bi , ^{212}Pb y ^{208}Tl retenidos en el organismo. Los detectores NaI(Tl) y HPGe pueden medir ^{212}Pb y ^{208}Tl y los detectores HPGe pueden medir ^{228}Ac en los pulmones.

Radiofármacos

Los trabajadores que manipulan radionucleidos no encapsulados en fuentes no encapsuladas en medicina nuclear podrían estar expuestos a altas incorporaciones de radiofármacos, especialmente los utilizados en radioterapia, de acuerdo a la norma ISO 16637[47]. Las medidas *in vivo* son recomendadas para la determinación de ^{99m}Tc y ^{18}F , en todo el organismo. Para el caso del ^{131}I se deben realizar medidas en el tiroides.

2.3. Materiales para la calibración de los sistemas de detección del CRC del Ciemat

Los métodos de medida considerados en este trabajo fueron técnicas *in vivo* de espectrometría gamma para medir la actividad de radionucleidos [Bq] retenida en todo el organismo humano o en diferentes órganos y tejidos tras una exposición interna.

Las fuentes utilizadas en la calibración de los CRC son maniqués simuladores del cuerpo humano, de cuerpo entero o de órganos, en los que se introducen los radionucleidos de interés.

Los sistemas de detección utilizados en esta tesis son un conjunto de cuatro detectores del tipo Low Energy Germanium (LEGe), que detecta emisores de fotones y rayos X en bajas energías y un contador Fastscan que consiste en dos detectores NaI(Tl) rectangulares colocados en columna.

2.3.1. Sistema de detección LEGe (Low Energy Germanium detectors)

El sistema Low Energy Germanium, LEGe, de la marca Canberra, lo componen cuatro detectores agrupados dos a dos (ver Figura 2.4). Cada uno de ellos tiene acoplado un preamplificador. Los detectores LEGe, por pares, están en el interior de un criostato (ACTII) y son refrigerados con nitrógeno líquido, con el fin de que permanezcan a una temperatura de 77 K. El llenado de nitrógeno se realiza desde un depósito de 60 l de nitrógeno líquido de baja presión (≤ 165 kPa) ubicado en el exterior de la cámara blindada.

Este sistema se encuentra en el interior de una cámara de bajo fondo radiactivo[48], única en España, construida con 13 cm de acero prenuclear, 5 mm de plomo, 1 mm de cobre y 1 mm de cadmio, tiene una puerta con igual blindaje y apertura automática. Estas características hacen que en su interior haya un fondo radiactivo ambiental con baja señal. Dispone de un sistema de ventilación independiente[49].



Figura 2.4: Detectores de germanio LEGe y cámara blindada que los alberga en el Laboratorio de Radiactividad Corporal del CIEMAT.

Los detectores LEGe están fabricados por Canberra[50], con un diámetro de 70 mm y 25 mm de espesor, con un área activa de 3800 mm², y una ventana de carbón epoxy de espesor de 0.5 mm. Los detectores están colocados en un mecanismo móvil, sobre una silla semirreclinada, y se puede mover en dirección horizontal, y en los ángulos acimutal y polar, de forma que se pueden colocar sobre el órgano o tejido a medir de la persona sometida a exposición interna.

El sistema LEGe está diseñado para ser especialmente eficiente en los fotones de bajas energías (10-400 keV) de RX y R γ . Con ayuda de la electrónica la amplificación se puede variar para poder medir en diferentes rangos energéticos llegando hasta 2000 keV. Tiene la característica de tener alta resolución.

El conjunto de los 4 detectores LEGe se utilizó para medir las configuraciones de contaminantes distribuidos en el organismo, en los pulmones y en el hueso. El detector LEGe nº 1 se utilizó para medir el yodo en el tiroides y heridas.

Cadena electrónica

La cadena electrónica la forman los instrumentos que se necesitan desde que un fotón impacta en el detector hasta que se puede visualizar el espectro en el PC. Consiste en un rack de alimentación[50] de baja tensión de Canberra que se conecta con 220 voltios y 50 Hz, tiene protección contra sobrecargas y calentamiento. Lo completan una fuente de alimentación (2,5 kV de tensión) que suministra corriente al detector con su respectivo preamplificador, este está unido a través de un cable coaxial al amplificador, que a su vez está unido al convertor analógico-digital, y éste al analizador multicanal (AM) que a través de la vía Ethernet se conecta al PC.

En cada impacto de los fotones, el detector recoge una carga que el preamplificador [50, 51] la convierte en señal de tensión y lo adapta a la entrada a través de un cable coaxial

al amplificador, donde los impulsos se magnifican de forma proporcional a una amplitud adecuada y se modifican hasta obtener una señal gaussiana. El amplificador es capaz de procesar las elevadas cantidades de impulsos que llegan en poco tiempo, aporta estabilidad durante largos periodos de funcionamiento, aunque también genera un ruido que perturba la señal.

La onda analógica en forma de pulso gaussiano, entra al conversor analógico digital, donde modifica la onda gaussiana a una onda cuadrada, que el conversor analógico-digital la transfiere al multicanal.

El analizador multicanal almacena los valores de las amplitudes de los impulsos, los clasifica y los transfiere vía Ethernet al ordenador del laboratorio, que accede a los datos y muestra el espectro gamma (histograma de impulsos) en pantalla a través del software.

2.3.2. Contador Fastscan

El contador Fastscan[52] pesa 4800 kg y su altura de 2,11 m, del ancho 1,12 m y profundidad 0,83 m, tiene una entrada, de 0,36 m, el espacio en el que permanece la persona es de 1,91 m de altura, de ancho 0,88 m y 0.37 m de profundidad (ver Figura 2.5).

Está formado por dos detectores de yoduro de sodio dopado con talio, NaI(Tl), de forma rectangular con unas dimensiones de 7,6 cm x 12,7 cm x 40,6 cm, están ubicados a lo largo del eje vertical. Los detectores están protegidos de la radiación de fondo en todas las direcciones por un blindaje de 10 cm de espesor de acero de bajo fondo. En la parte interior, la pared está cubierta por una chapa de metal pintada, por si es necesaria una descontaminación y el suelo tiene un revestimiento de plástico.

Está diseñado para realizar medidas rápidas con el fin de determinar la exposición interna de radionucleidos emisores γ , con energías entre 100 keV a 2 MeV.

El detector NaI(Tl) es un detector de centelleo, está formado por una sustancia luminiscente y un fotomultiplicador. El detector de centelleo produce un pulso de luz por la interacción de rayos gamma con el material centelleador. El tamaño de pulso es proporcional a la energía depositada en el detector. El tubo fotomultiplicador montado sobre el material centelleador convierte la luz en una señal eléctrica que es proporcional al tamaño del pulso de luz y, por tanto de la energía del fotón.



Figura 2.5: Sistema de detección Fastscan, formado por dos detectores NaI(Tl) colocados en columna del CRC del CIEMAT.

Cadena electrónica

La cadena electrónica[52] asociada consiste un Analizador Multicanal modelo ASA-100, en el que están integrados todos los componentes necesarios para soportar el sistema espectrométrico de detectores NaI(Tl). Consta de una fuente de alimentación de alto voltaje (800 V para cada detector), una fuente de alimentación para el preamplificador, amplificador de conformación, estabilizador de ganancia, ADC, la memoria y la placa bus PCI.

El paso de la señal al Analizador Multicanal y la transformación que se produce, son del mismo orden que lo descrito en el sistema LEGe. La diferencia está en que todos los dispositivos electrónicos están integrados en un solo dispositivo, el analizador multicanal.

2.3.3. Software de adquisición y gestión de datos

El sistema está controlado a través del paquete de software Abacos2000-Genie2000 “Whole Body Counting” bajo el entorno Windows XP. Permite la adquisición de datos y composición de los espectros para su posterior análisis.

Se posicionan fuente y detector en la geometría considerada, y a través del software se realiza la adquisición del espectro. Los espectros de cada detector se almacenan en una tarjeta del analizador multicanal ASA-100 basado en una configuración de procesamiento de señales.

El software Abacos-Genie 2000[53] se muestra a través de una pantalla (ver Figura 2.6) en la que se visualiza los ejes de coordenadas, donde el eje x se divide en canales y el eje y es el número de cuentas que inciden en cada canal. Al lado izquierdo, tiene botones de herramientas para adquisición de la medida, ampliación de una zona del espectro,

seleccionar regiones de interés dentro del espectro, poder visualizar el espectro anterior y posterior, se puede posicionar los marcadores para seleccionar una zona, y el cursor para seleccionar un centroide. Muestra múltiple información sobre el espectro. En la parte superior las herramientas están relacionadas con el cursor, tales como el canal, energía, cuentas, tiempo de medida. En la parte inferior, la información es sobre los marcadores y el centroide, los parámetros más útiles que muestra son la posición de ambos marcadores en el canal y energía, el área, la anchura a mitad de altura, proporción de la gaussiana y otros como el tiempo muerto.

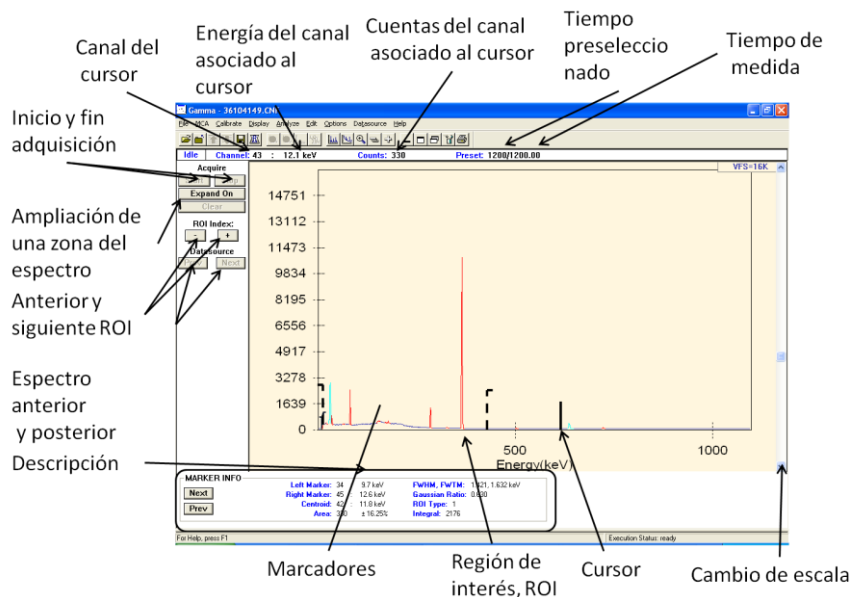


Figura 2.6: Ventana del software Genie 2000 utilizado para la adquisición y análisis de las mediciones.

En la medida se obtiene el espectro con el número de cuentas en cada canal que, a través de la calibración en energía, se relaciona linealmente con la energía. El software tiene integrado unas librerías con la información de las emisiones energéticas de diferentes radionucleidos. Además, el software permite automatizar el análisis a través de secuencias de análisis, en las que se les introduce los pasos a seguir en cada caso y define cada sistema de medida de una forma diferente.

El sistema LEGe es definido en el software como 4 entradas de detectores individuales. En cada caso se establece una región de adquisición de 4096 canales para un rango de energía de 0-1000 keV, lo que supone 0.24 keV/canal. El software agrupa los detectores individuales formando los grupos de detectores All_summed, es la suma de la señal que viene de los cuatro detectores, Det 1-2, es la suma de la señal que viene de los detectores 1 y 2, Det 3-4, es la suma de la señal que viene de los detectores 3 y 4. En total hay un resultado de 7 espectros, 4 espectros de la señal de los detectores individuales y otros 3 de la composición de diferentes señales de los detectores. Para el caso de la detección de ^{131}I en tiroides se utiliza el detector 1 del sistema LEGe.

Para el sistema Fastscan hay definidas dos entradas de detectores individuales. Con 1024 canales para un rango de energía de 0-2000 keV, lo que supone 1.95 keV/canal. El software agrupa las señales de los dos detectores individuales en un grupo de detectores All_summed, que es la suma de la señal de ambos detectores. Por tanto, los espectros que se obtienen son dos individuales, obtenidos del detector superior e inferior, y un tercero como resultado de la suma de ambos. Para el caso de ^{131}I en tiroides se utiliza un solo detector, el más eficiente dependiendo de la altura del individuo, se utiliza el inferior o superior.

El software almacena los espectros en formato .CNF. Incorpora información del análisis como las calibraciones en energía y eficiencia aplicadas, librería de análisis, secuencia de análisis y los datos asociados al sujeto de la medida (individuo, fuente puntual o maniquí de calibración o validación).

El software Genie2000/ Abacos2000 permite realizar las siguientes operaciones[53]:

- Adquisición de la medida, y composición de la señal suma con los espectros de los detectores individuales.
- Visualización del espectro con expansión en zonas de interés.
- Creación y borrado de regiones de interés (ROI) en los picos.
- Cuantifica el área de la ROI para su posterior cuantificación de la actividad.
- Mide la anchura a mitad de altura (FWHM) del pico, que determina la resolución del pico.
- Muestra información sobre el espectro como el tiempo de medida, y zonas de interés.
- La calibración se puede hacer de forma manual, paso por paso, o automática en la que muestra la curva y se puede editar eliminando e introduciendo puntos para una recalibración del sistema más ajustada.
- El análisis espectral se hace por la búsqueda de picos, a partir de la segunda derivada o a partir de una librería adecuada. Se puede hacer análisis manual de los picos de interés, paso a paso y con librerías definidas.
- Reanalizar el espectro y cambiar los parámetros de análisis.
- Incorpora un programa de control de calidad (QA, Quality Assurance) que permite visualizar los datos del chequeo de la calibración y del fondo del equipo.

2.3.4. Espectrometría gamma (γ)

La radiación gamma[54] es una radiación electromagnética, situada en el rango del espectro de altas energías (entre keV y MeV) y longitud de onda corta. La radiación γ se produce como consecuencia de la desexcitación de un núcleo cuando vuelve a su estado

fundamental emitiendo uno o varios fotones. Las energías γ son únicas y características de cada especie radiactiva.

Los mecanismos principales de interacción de la radiación con la materia son: (1) el efecto fotoeléctrico (interacción entre un fotón y un átomo), (2) el efecto Compton (interacción de un fotón y un electrón débilmente ligado al átomo ($E_b \ll E$) que se puede considerar como libre), y la creación de pares (la energía se utiliza en la creación de un par electrón-positrón, esas dos partículas salen disparadas del núcleo compartiendo la energía convertida en energía cinética).

El espectro energético de un radionucleido emisor γ es discreto, está formado por una o varias líneas monoenergéticas, cuyas energías e intensidades son específicas de cada radionucleido.

Un espectro de energía es un histograma de impulsos, la distribución de los fotones con el detector en función de la energía, ver Figura 2.7. Las cuentas se van clasificando en los canales en función de la energía depositada de los fotones al interaccionar con el detector. La distribución de las cuentas genera diferentes picos con forma gaussiana en el espectro. Cada pico se caracteriza por tener un centroide que indica la energía de emisión, y permite identificar el radionucleido emisor γ . La anchura a mitad de altura (FWHM) del pico, indica la capacidad de resolución del sistema, aumenta a medida que lo hace la energía. El número de cuentas acumuladas en el fotopico, el área del pico, con una energía determinada es el número de pulsos detectados por el equipo de medida durante el tiempo de contaje, y es proporcional a la actividad (Bq) del radionucleido, a través de la eficiencia de calibración del equipo.

Los fotopicos se utilizan en espectrometría γ para el análisis cualitativo (identificación) y cuantitativo (cálculo de actividad) de los radionucleidos.

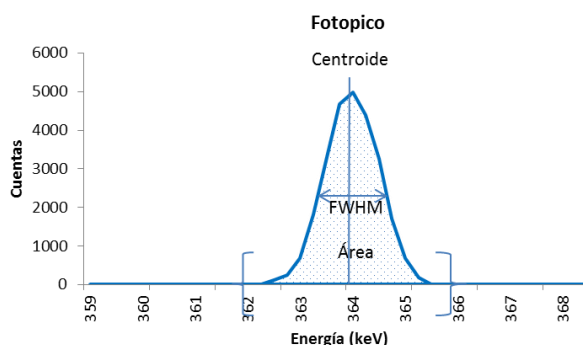


Figura 2.7: Fotopico pico de un espectro gamma delimitado por una ROI y en cuyo interior se representa el número de cuentas (proporcionales a la actividad) en función de la energía representado por el centroide.

El análisis espectral[55] consiste en extraer del espectro de energías la máxima información mediante el análisis de los datos obtenidos. La anchura de los picos depende de la resolución del detector. A partir del espectro obtenido se trata de identificar los radionucleidos presentes en la muestra y calcular su actividad [Bq].

2.3.5. Maniqués de calibración

Los maniqués son simuladores de todo el cuerpo, de un órgano o tejido. En este trabajo, he diseñado maniqués basándome en las dimensiones (altura y peso) recomendadas por la publicación ICRP 89, y la OMS[56, 57] y un estudio de cuello que se explica más adelante. Los materiales utilizados en su fabricación tienen las propiedades de densidad y atenuación similares a la de los diferentes tejidos del organismo, (graso, muscular y hueso) según se explica en la publicación ICRU 44[58]. Los patrones utilizados en este trabajo de tesis son simuladores de cuello- tiroides, de cuerpo entero, de pulmón, de rodilla, de cráneo y de heridas.

2.4. Métodos de calibración

La metodología utilizada en este trabajo consiste en calibrar cada equipo en energías, en anchura del pico (FWHM, Anchura a Mitad de Altura) y en eficiencia, para poder identificar y evaluar las actividades de las fuentes radiactivas contaminantes retenidas en el interior de la persona expuesta.

El resultado de una medida se visualiza en la pantalla de ordenador (Multicanal) como un espectro con las cuentas en función de los canales. Los fotopicos del espectro están relacionados con la energía de emisión gamma de la fuente.

La calibración energía-canal consiste en relacionar el canal correspondiente a cada pico con su energía de emisión, que es conocida. Esta calibración permite la identificación de los radionucleidos contaminantes.

La calibración en eficiencia en función de la energía depende de la geometría de medida, teniendo en cuenta el posicionamiento entre la fuente y el detector. Sabiendo la actividad de las fuentes utilizadas en la calibración, se calcula la relación entre el área del pico en función del tiempo de medida en cuentas por segundo (cps) y el valor de la actividad (Bq) para la energía correspondiente. Esta relación indica el factor de eficiencia asociado a dicha energía. El ajuste es una curva polinómica que relaciona el logaritmo neperiano de la eficiencia con el logaritmo neperiano de la energía. Esta es la calibración que permite calcular la actividad de una fuente similar dentro de un individuo contaminado, y situado en la misma geometría de contaje que en la calibración.

Una vez calibrado el sistema de detección se realiza una medida en un maniquí blanco o una persona blanco para calcular el límite de detección (LD) de las técnicas en cada geometría de contaje.

2.4.1. Calibración en Energía

La selección de las fuentes radiactivas adecuadas para la calibración es importante; hay que tener en cuenta que las energías e intensidades de emisión de la fuente estén dentro del rango característico del detector, así como su periodo de semidesintegración. Cada radionucleido tiene emisiones únicas, con energías e intensidades características. Es conveniente utilizar fuentes radiactivas que producen fotopicos simples para facilitar la identificación del centroide.

Se colocan las fuentes radiactivas a una cierta distancia del equipo y a través del software Abacos2k- Genie2k, se adquiere una medida. El resultado es un espectro que representa el número de cuentas (eje y) por cada canal (eje x) en el que se observan los picos. Cada pico corresponde a una emisión del radionucleido, su área se delimita con una región de interés (ROI), representando el número de cuentas que es proporcional a la actividad de la fuente radiactiva.

Una vez conseguido el espectro, el proceso de calibración en energía que realicé consiste en la selección del centroide de cada pico y relacionarlo con la energía que le corresponde. Al representar los puntos de la energía vs el canal se obtiene una relación energía-canal, que se ajusta a una regresión lineal, cuya ecuación va a relacionar las energías con los canales, lo que se llama calibración en energía. Esta calibración permite identificar a los fotopicos correspondientes a radionucleidos que estén en el interior del organismo.

2.4.2. Calibración en resolución o en anchura a media altura, FWHM (Full Width at Half Maximum)

La calibración en resolución consiste en relacionar la anchura a la mitad de altura (FWHM) de cada uno de los picos con la energía, lo cual está relacionado con la resolución del sistema de detección. Se hace simultáneamente a la calibración en energía, recogiendo el valor de la anchura a mitad de altura (keV) de cada pico seleccionado y relacionándolo con la energía (keV) del centroide, obteniendo una curva de FWHM en función de la propia energía. A medida que aumenta la energía, la FWHM también aumenta, es decir, en general los equipos tienen mejor resolución en las energías más bajas que en altas.

2.4.3. Calibración en eficiencia

La calibración en eficiencia es necesaria para que, una vez identificado el isótopo radiactivo, se cuantifique su actividad, y depende de la geometría. Consiste en medir un patrón con una geometría determinada en una posición y distancia fijas con respecto al sistema de detección. Los patrones utilizados en un contador de radiactividad corporal son simuladores de la contaminación interna de una persona en cuerpo entero, en órganos o en tejidos. Se trata de maniqués fabricados con características de atenuación y densidades similares a las producidas en la interacción de la radiación gamma con el tejido humano de una persona contaminada. Las fuentes radiactivas de calibración consisten en radionucleidos con emisiones energéticas y actividad (Bq) conocidas.

Para definir la geometría de contaje, hay que tener en cuenta la distancia maniquí-detector y la posición de los maniqués ha de ser reproducible para las personas, considerando que cada posicionamiento supone un factor de calibración en eficiencia diferente.

Para proceder con la calibración en eficiencia, primero hay que definir una geometría de contaje del maniquí de forma que los detectores formen un ángulo sólido que sea el máximo posible. El resultado de la medida de calibración da lugar a un espectro característico, con fotopicos cuyo área [cuentas] está relacionada con la actividad (**A**) de la fuente a través de la ecuación 2.1, obteniendo el factor de calibración, **F_{Eff}** en [cps/Bq].

$$F_{Eff} = \frac{\text{cuentas}}{t(s) \cdot A(\text{Bq})} \left[\frac{\text{cps}}{\text{Bq}} \right] \quad (2.1)$$

La normalización de los factores de calibración se obtiene dividiéndolos por la intensidad de emisión (**I_e**) de cada fotopico, obteniendo una relación de las eficiencias [cuenta/gamma] con la energía (keV), ver ecuación 2.2.

$$Eff = \frac{\text{cps}}{I_e \cdot A(\text{Bq})} \left[\frac{\text{c}}{\text{g}} \right] \quad (2.2)$$

La incertidumbre asociada a la eficiencia viene dada por la ecuación 2.3.

$$\Delta Eff = Eff \cdot \sqrt{\frac{4}{\text{cps} \cdot t(s)} + \frac{\Delta A^2}{A^2}} \quad (2.3)$$

Representado gráficamente las eficiencias vs energías se obtiene una serie de puntos que se ajustan a una curva logarítmica en todo el rango de energía de detección. Esto permite que en cualquier medida realizada con la misma geometría de calibración, para contaminaciones con emisiones energéticas diferentes a las de calibración, se interpole la

eficiencia y junto con el área que encierra el pico y el tiempo de medida, permitan calcular la actividad.

La actividad del maniquí (fuente patrón) en la fecha de medida se calcula por decaimiento con la ecuación 2.4, a partir de la actividad de referencia de la fuente en la fecha de calibración, proporcionada por el certificado de calibración que emite el fabricante.

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \quad (2.4)$$

Donde:

A es la actividad de la fuente (Bq)

A₀ es la actividad inicial de la fuente (Bq)

T_{1/2} es el periodo de semidesintegración de la fuente (d)

t es el tiempo transcurrido desde la fecha de calibración de la fuente hasta el momento de la medida (d)

2.4.4. Validación de la calibración

Las calibraciones para que puedan ser utilizadas han de ser validadas. Para ello, se realizan una serie de n medidas, en la misma geometría a poder ser con diferentes patrones que los de calibración. El número de medidas recomendadas por ISO 28218 "Performance Criteria for Radiobioassay"[59] es de al menos 5 para asegurar la fiabilidad estadística. Los resultados de las medidas de validación se valoran a partir de los parámetros de exactitud y precisión definidos en dicha norma junto a los criterios de aceptación de los mismos.

- Exactitud

Es la comparación de la actividad medida (*A_i*) con la actividad real (*A_{ai}*) de la fuente, calculada por decaimiento radiactivo a la fecha de medida. Esta comparación se realiza a través de la ecuación 2.5.

$$B_{ri} = \frac{A_i - A_{ai}}{A_{ai}} \quad (2.5)$$

La exactitud relativa, *B_r*, es el promedio de los valores de la exactitud en cada medida (*B_{ri}*), para las n medidas realizadas, ver ecuación 2.6. **El rango de aceptación de exactitud (*B_r*) está entre -0.25 y +0.50.**

$$B_r = \frac{\sum_i B_{ri}}{n} \quad (2.6)$$

- Precisión

Es la dispersión relativa de los valores de la exactitud en cada medida (B_{ri}), respecto a su valor promedio (B_r), ver ecuación 2.7. **El rango de aceptación de la precisión (SB_r) es menor o igual a 0.4.**

$$SB_r = \sqrt{\frac{\sum_i^n (B_{ri} - B_r)^2}{(n-1)}} \quad (2.7)$$

2.5. Límites de detección

El límite de detección (LD)[59-62] en un CRC es el valor mínimo de actividad medible que es capaz de detectar la técnica de medida. Es el valor más pequeño del mensurando para el que la probabilidad de asumir erróneamente que el efecto físico no está presente no excediendo una probabilidad β especificada. El límite de detección evalúa la capacidad que tiene un equipo de detección para discernir entre la radiación de fondo y una persona contaminada internamente.

Se calcula considerando la eficiencia de la medida y el tiempo de contaje en una medida blanco.

En el espectro se considera un fotopico como se muestra en la Figura 2.8, en el que la región de interés (ROI) lo forman el Área B1, el pico de interés y el Área B2. El pico de interés forma el 95 % del área del pico con p canales y el Área B1 y Área B2 forma el 5 % del área del fotopico con m canales cada uno. El LD es distinto para cada persona; se calcula de acuerdo con las normas ISO 28218[59] e ISO 11929[61] con la ecuación 2.8.

$$LD(Bq) = \frac{2k_{1-\alpha} \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon}\right)^2 \left(\frac{p}{2m} n_0 + \left(\frac{p}{2m}\right)^2 n_0\right) + k^2_{1-\alpha} \left(\frac{1}{\epsilon}\right)}}{1 - k^2_{1-\alpha} \left(\frac{u(\epsilon)}{\epsilon}\right)^2} \quad (2.8)$$

Donde:

n_0 es el número de cuentas del Área B1 y Área B2

p es el número de canales del pico de interés

m es el número de canales del Área B1 y del Área B2

ϵ es la eficiencia [cps/Bq o c/ γ]

$u(\epsilon)$ es la incertidumbre de la eficiencia [cps/Bq o c/ γ]

$k_{1-\alpha} = 1.645$

La ecuación 2.8 es la interpretación de la norma ISO 11929[61] para el cálculo del límite de detección descrito en el Informe Técnico del CIEMAT de C. Perez[63], Umbral de

Decisión (UD) y Límite de Detección en Medidas Espectrométricas aplicado a la espectrometría γ .

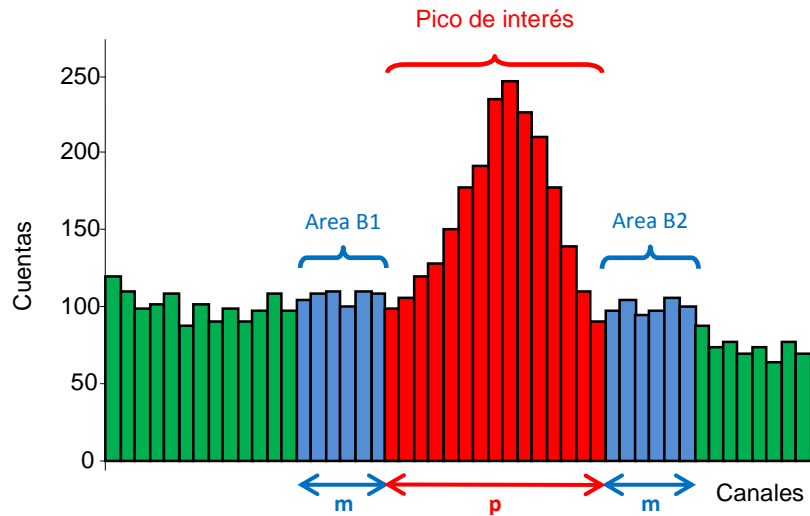


Figura 2.8: Descomposición de un fotopico en canales para calcular el LD.

2.6. Incertidumbres

La incertidumbre de la medida es el parámetro asociado al resultado de la actividad que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente a una medida directa. Para la evaluación de incertidumbres se debe tener en cuenta tanto las incertidumbres de tipo A, que son estimadas a partir de consideraciones estadísticas y pueden ser descritas por la distribución de Poisson, y las incertidumbres de tipo B atribuibles a otros factores no relacionados directamente con el conteo.

La actividad de los radionucleidos depositados en el organismo humano está dada por la ecuación 2.9.

$$A_E = \frac{N_E}{\varepsilon_E \cdot t \cdot I_e} \quad [Bq] \quad (2.9)$$

Los resultados de la actividad que se mide en el CRC se dan como $A \pm 2\sigma_A$ [Bq]

Donde:

A_E es la actividad del radionucleido basado en el fotopico de energía E [Bq]

N_E es el área neta del fotopico con energía E [cuentas]

ε_E es la eficiencia del detector en la energía E [cuentas/ γ]

t es el tiempo vivo de medida [s]

I_e es la intensidad de emisión del radionucleido con emisión E

La estimación de las fuentes de incertidumbre[64] de forma general consta de los siguientes pasos.

- Exploración de todos los factores que influyen en la medida.
- Cuantificación de las incertidumbres de cada uno de los factores en los resultados de medida.
- Estimación de la incertidumbre total de la medida.

Los factores de incertidumbre identificados que influyen en la medida son:

- a) Área neta del pico. (Estadística de contaje. Fondo lineal o función escalón)
 - b) Resta del fondo ambiental (contribución de picos de interferencia con la medida)
 - c) Eficiencia de detección (influyen la incertidumbre asociada a la actividad de la fuente patrón y la incertidumbre asociada a la medida de calibración)
 - d) Intensidad de emisión
 - e) Tiempo de medida
- a) **Área neta del pico[64, 65]**: Depende de la estadística de contaje. La incertidumbre estadística de las áreas netas de los picos puede ser reducida con el uso de muestras de alta actividad y tiempos largos de medida. El uso de actividades altas debe de ser evitado por la posible saturación del detector, provocando tiempos muertos, que se consideran aceptables cuando son menores del 20 %. La incertidumbre relativa de la estadística de las áreas netas de los picos de los espectros de calibración puede ser aceptada con un valor por debajo del 10 %.

Corrección del fondo ambiental. Cálculo del área neta del pico

Se tiene en cuenta el fondo correspondiente a la ROI del fotopico de la medida, siendo que el fondo es una función lineal o de tipo "Step" (ver Figura 2.9). El área neta "N" del fotopico se calcula según la ecuación 2.10.

$$N = G - B \quad (2.10)$$

donde:

G son las cuentas dentro de la región del pico (ROI) del pico, $B = \left(\frac{N}{2}\right) \left(\frac{B_1}{n_1} + \frac{B_2}{n_2}\right)$

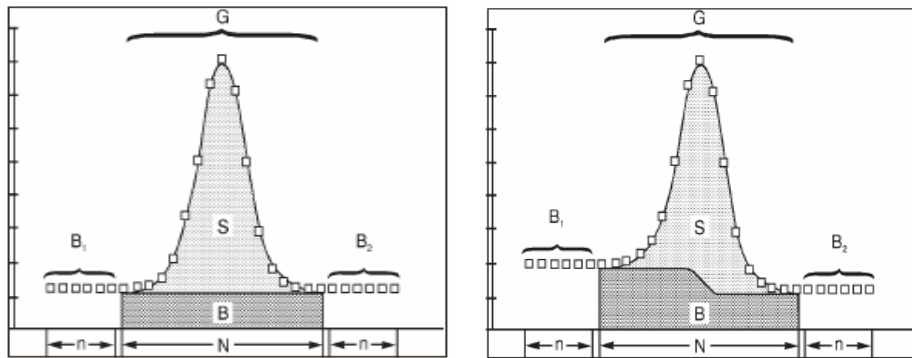


Figura 2.9: Picos de fondo tipo lineal y escalón (step) que pueden ser utilizados en la resta del fondo ambiental.

La incertidumbre del área del fondo, en cuentas, se calcula a partir de su varianza, con la ecuación 2.11.

$$u(B) = \sigma_B = \frac{N}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{B_1}{n_1} + \frac{B_2}{n_2}\right)} \quad (2.11)$$

Donde:

n es número de canales en la ROI

B_1 es Área de la región a la izquierda del pico (región con n_1 canales de anchura) [cuentas]

B_2 es Área de la región a la derecha del pico (región con n_2 canales de anchura) [cuentas]

La incertidumbre del área neta del pico, teniendo en cuenta la distribución de Poisson del pico se expresa como la ecuación 2.12.

$$u(N) = \sigma_N = \sqrt{G + \sigma_B^2} \quad (2.12)$$

- b) **Área neta con la corrección de la interferencia del fondo ambiental[64]:** Se resta la medida del fondo ambiental cuando hay presencia de un pico de interferencia en la ROI debido a radiación de fondo ambiental, determinado por una medida de fondo separada. El tiempo de la medida juega un papel importante para reducir la incertidumbre estadística de la interferencia. El área neta de una medida en la que hay que restar el fondo está dado por la ecuación 2.13, el pico de interferencia de fondo ambiental, I , (en cuentas) está calculado por la ecuación 2.14 y su incertidumbre por la ecuación 2.15.

$$N = (G - B) - I \quad (2.13)$$

$$I = \frac{t}{t_B} I_B \quad (2.14)$$

$$u(I)^2 = \left(\frac{t}{t_B}\right)^2 u(I_B)^2 \quad (2.15)$$

Donde:

t es el tiempo de la medida [s]

t_B es el tiempo de medida del de fondo [s]

I_B es el área neta del pico de fondo [cuentas]

$u(I_B)$ es la varianza del pico de fondo [cuentas]

La incertidumbre del área neta con la corrección de fondo esta dada por la ecuación 2.16.

$$u(N) = \sigma_N = \sqrt{(G + u(B)^2 + u(I)^2)} \quad (2.16)$$

- c) **Eficiencia del detector [65]:** La calibración en eficiencias consiste en evaluar los espectros de una medida determinada y calcular los factores de eficiencias de los fotopicos, normalizarlos y ajustarlos a una curva. La ecuación utilizada para el cálculo de la eficiencia es la ecuación 2.17.

$$\varepsilon = \frac{N_E}{A_E \cdot t \cdot \gamma_d \cdot K} \quad (2.17)$$

Donde:

K es la corrección por decaimiento de la actividad del radionucleido,

$$K = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad (2.18)$$

t es el tiempo transcurrido entre el comienzo de la adquisición de la medida y la referencia de la fecha de calibración de la fuente [s]

$T_{1/2}$ es el período de semidesintegración del radionucleido [s]

La incertidumbre asociada a la eficiencia se calcula según la ecuación 2.19, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- i. Actividad y preparación del patrón de calibración
- ii. Áreas de los picos en los espectros de calibración
- iii. Corrección por decaimiento
- iv. Intensidad de emisión
- v. Atenuación en energías bajas

$$u(\varepsilon) = \sigma_\varepsilon = \varepsilon \cdot \sqrt{\left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(K)}{K}\right)^2 + \left(\frac{u(y)}{y}\right)^2} \quad (2.19)$$

- i. Actividad y preparación del patrón de calibración: Los patrones de calibración tienen que ser trazables, un certificado de calibración lo garantiza y muestra todos los datos de incertidumbre de la actividad $u(A)$ relativos a la fabricación. No excederá el 5 % para garantizar fiabilidad en la fuente. La incertidumbre combinada de la actividad de los radionucleidos y preparación de un patrón de calibración se incluye en el fichero (CTF) del certificado utilizado en el software Genie2000-Abacos2000.
- ii. Áreas de los picos en los espectros de calibración: El área de los fotopicos tiene una incertidumbre del número de cuentas $u(N)$. La incertidumbre depende del fotopico y se ha mostrado en el apartado anterior a través de las ecuaciones 2.12 y 2.16.
- iii. Corrección por decaimiento de la fuente en el momento de la calibración, $u(K)$, está dado por la ecuación 2.18. Su incertidumbre se calcula a partir de la ecuación 2.22. que tiene en cuenta dos factores, el primero el decaimiento de la fuente desde que se certificó la fuente hasta el inicio de la medida, $u(K_w)$, (ecuación 2.20), y el segundo el decaimiento que se produce de la fuente durante la medida, $u(K_M)$, (ecuación 2.21).

$$u_{K_w} = \sigma_{K_w} = \frac{K_w \cdot \ln 2 \cdot t_{ww}}{(T_{1/2})^2} \sigma_{T_{1/2}} \quad (2.20)$$

$$u_{K_M} = \sigma_{K_M} = \left| K_M - e^{-\frac{t_M \cdot \ln 2}{T_{1/2}}} \right| \cdot \frac{\sigma_{T_{1/2}}}{T_{1/2}} \quad (2.21)$$

$$u_K = \sigma_K = K \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{K_w}}{K_w}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{K_M}}{K_M}\right)^2} \quad (2.22)$$

Las incertidumbres debidas al decaimiento de la fuente son muy bajas comparado con el resto de incertidumbres, por lo que se pueden considerar despreciables.

Donde:

t_w es el tiempo transcurrido desde la fabricación de la fuente hasta la medida [s]

t_M es el tiempo que dura la medida [s]

$T_{1/2}$ es el valor del periodo de semidesintegración [s]

$\sigma_{T_{1/2}}$ es la incertidumbre del periodo de semidesintegración [s]

- iv. Intensidad de emisión: Las librerías utilizadas para la espectrometría γ contienen la

intensidad de emisión y la incertidumbre $u(y)$ asociada correspondiente a cada línea energética de los radionucleidos que se miden en el ensayo. En el caso de que no esté el valor de la $u(y)$ se puede considerar despreciable.

- v. Atenuación para energías bajas: La medida directa a individuos que contienen fuentes con emisiones de RX y γ en energías bajas, tienen incertidumbres debidas a la atenuación del propio individuo medido. La eficiencia en bajas energías depende del espesor de tejidos que tengan que atravesar los fotones, por tanto depende de las condiciones anatómicas. La eficiencia corregida en atenuación para bajas energías, ε' , y su incertidumbre, $\sigma_{\varepsilon'}$, se pueden calcular con las ecuaciones 2.23 y 2.24.

$$\varepsilon' = \varepsilon \cdot e^{-\mu(E) \cdot x} \quad (2.23)$$

$$\sigma_{\varepsilon'} = \varepsilon' \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^2 + (\rho \cdot t \cdot \sigma_{\mu(E)})^2 + (\mu(E) \cdot \sigma_{\rho x})^2} \quad (2.24)$$

Donde:

$\mu(E)$ es el coeficiente de atenuación que depende del material y de la energía [cm^{-1}]

ε es la eficiencia de detección no atenuada por factor de corrección [c/γ]

x es el espesor de tejido [cm]

d) Tiempo de medida

La alta tasa de contaje puede provocar tiempos muertos altos, se debe evitar trabajar con tasas de tiempo muerto superiores al 20 %. En la medida directa del CRC las tasas de contaje son bajas por lo que se puede considerar que la incertidumbre del tiempo $u(t)$ de medida es despreciable.

Las fuentes de incertidumbres principales en la medida directa de la actividad (**A**) de un radionucleido emisor de rayos X o de radiación gamma incorporado al organismo en el CRC-CIEMAT son las incertidumbres de tipo A:

- La incertidumbre asociada a la estadística de contaje de la medida, $u(N)$, y la incertidumbre asociada a la eficiencia de calibración, $u(\varepsilon)$. Esta última, a su vez, tiene dos fuentes principales de incertidumbre: la incertidumbre asociada a la estadística de contaje de la medida de calibración, $u(N)$ y la incertidumbre asociada a la actividad del patrón, $u(A)$.

- Se consideran prácticamente despreciables las incertidumbres asociadas a la intensidad de la línea de emisión $u(y)$ y al decaimiento radiactivo de la fuente $u(K)$.

Las incertidumbres son calculadas en 2σ , con un nivel de confianza del 95 %, se calcula por la ecuación 2.25.

Los resultados del laboratorio se expresan como $A \pm 2\sigma_A$

$$u(A) = \sigma_A = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_K}{K}\right)^2} \quad (2.25)$$

Muy pequeñas

Dónde:

σ_N es la incertidumbre del área neta del pico

σ_ε es la incertidumbre asociada a la eficiencia de detección

σ_y es la incertidumbre asociada a la intensidad de emisión del pico

σ_K es la incertidumbre asociada al factor de corrección por decaimiento radiactivo de la actividad

Las fuentes de incertidumbre tipo B son específicas de cada medida [8, 66], depende de factores no correspondientes al conteo, tales como variaciones de la geometría de conteo respecto a la de calibración; posición relativa del individuo con el detector y el movimiento de la persona durante el conteo; las diferencias entre el maniquí y el individuo o el órgano medido, incluyendo características geométricas, densidad, distribución del radionucleido en el interior del cuerpo y órgano y coeficiente lineal de atenuación; la interferencia del material radiactivo depositado en regiones del cuerpo adyacentes; la resolución espectroscópica por solapamiento de pico; estabilidad electrónica; interferencia de otros radionucleidos, interferencia de elementos radiactivos naturales presentes en el cuerpo. Estas incertidumbres están valoradas por la norma ISO 27048 como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Valores típicos para los componentes de la incertidumbre tipo B lognormal en mediciones *in vivo* con emisiones energéticas bajas, medias y altas, dados por la norma ISO 27048

Fuente de Incertidumbre tipo B	Bajas Energías E < 20 keV	Energías Intermedias 20 keV < E < 100 keV	Altas Energías E > 100 keV
Variación en el posicionamiento del detector	1.2	1.05	< 1.05
Variación en la señal de fondo	1.5	1.1	< 1.05
Variación en las dimensiones corporales	1.5	1.12	1.07
Variación en los materiales que cubren la fuente	1.3	1.15	1.12
Variación en la distribución de la Actividad	1.3	1.05	< 1.05
Calibración	1.05	1.05	1.05
Análisis espectral ¹	1.15	1.05	1.03

¹ Espectro de un detector de germanio de alta pureza

La valoración de las incertidumbres de medidas *in vivo* se muestra en las tablas 2.2 y 2.3. La incertidumbre tipo A es similar en los tres rangos energéticos considerados, aunque ligeramente superior para las bajas energías, sin embargo, la incertidumbre tipo B, para bajas energías es casi el doble que para altas energías, lo que implica que la incertidumbre total en bajas energías es más elevada que en las medias y altas energías.

Tabla 2.3: Valores típicos de las incertidumbres tipo A y B para medidas *in vivo* de los radionucleidos emisores en bajas, medias y altas energías de radiación. Fuente ISO 27048

Tipo de Incertidumbre	Bajas Energías E < 20 keV	Energías Intermedias 20 keV < E < 100 keV	Altas Energías E > 100 keV
Total tipo A	1.5	1.3	1.07
Total tipo B	2.06	1.25	1.15
Total	2.03	1.4	1.2

Las incertidumbres tipo A y B se utilizan para el cálculo del llamado scattering factor (**SF**)[8, 45], de acuerdo a la ecuación 2.26, indicada en la norma ISO 27048[8]. El SF[66] es la desviación geométrica estándar asociada a una distribución lognormal de la actividad medida. Se utiliza en dosimetría interna para la estimación de la actividad incorporada *I* [Bq] a partir de los resultados de actividad medida *Ai* [Bq] junto con sus incertidumbres asociadas (**SFi**).

$$SF = e^{\sqrt{(\ln SF_A)^2 + (\ln SF_B)^2}} \quad (2.26)$$

Donde:

$$SF_A = e^{\sqrt{\sigma_A/A}} ; A \text{ es la actividad medida y } \sigma_A \text{ es su incertidumbre;}$$

SF_B está dado por los valores de la Tabla 2.2.

Capítulo 3: Medida de ^{131}I en tiroides de población expuesta en situación de emergencia radiológica y nuclear

3.1. Introducción

El yodo es un elemento químico de número atómico 53 dentro del grupo de los halógenos. Se encuentra en la naturaleza en pequeñas cantidades pero en muchos lugares y en el agua de mar. La forma química más común del yodo es en solución acuosa. En la industria se encuentra en diversas formas químicas y físicas, incluyendo vapores y gases, en componentes orgánicos y en metales.

El estado natural del yodo es el isótopo estable ^{127}I . Existen 36 isotopos inestables; ^{131}I , ^{129}I y ^{132}I , están relacionados con accidentes de los reactores nucleares y se presentan en fragmentos de combustible irradiado. El ^{123}I y el ^{125}I son utilizados en medicina como trazadores de imagen. El ^{131}I es el radioisótopo artificial más utilizado para diagnóstico y tratamiento de cáncer de tiroides; sus emisiones son rayos X, radiación beta y gamma y tiene un periodo de semidesintegración de 8 días.

La glándula tiroides tiene forma de mariposa, y está formada por dos lóbulos laterales que se conectan por un istmo. Cada lóbulo mide [67] entre 4-6 cm de alto, 1.3-1.8 cm de ancho. Estas dimensiones varían según el individuo, la edad y el sexo. El istmo mide 4-5 mm de grosor. Su peso es de 15-25 g para los adultos, aunque puede llegar a 30 g. En las mujeres aumenta su tamaño durante la menstruación y embarazo [68]. Está situado en el cuello [69] a la altura de las vértebras C5 y T1, justo por debajo de la laringe. En su cara posterior abraza al cartílago cricoides y a la tráquea. Entre la glándula tiroidea y la piel se encuentran tejidos blandos, formando el espesor de cuello, que varían según cada persona.

El yodo es el activador de los folículos del tiroides para que la tiroglobulina actúe como matriz en la producción y almacenamiento de las hormonas [70]. Las hormonas son almacenadas en la propia glándula en cantidades suficientes para un abastecimiento de 100 días y van siendo secretadas por el tiroides a la sangre.

Para la producción de las hormonas [71] se necesita yodo, que en general procede de la alimentación a través de la sal de yoduro de potasio (99 %), que es vital para el cuerpo humano.

En caso de una exposición interna accidental, el yodo radiactivo (típicamente ^{131}I) se puede incorporar al organismo por inhalación, ingestión, inyección o a través de una

herida. Cuando el ^{131}I se incorpora vía inhalación a través del aparato respiratorio[40], el 80 % es absorbido en sangre pocos minutos después de la inhalación. Parte de la contaminación por inhalación pasa al aparato digestivo a través de la faringe y el esófago[42], que tendrá el mismo tratamiento que por la ingesta de alimentos.

A través de la ingestión[42], una porción sustancial del yodo se concentra en las glándulas salivares y el estómago como zonas activas de transporte, y cuando llega al intestino delgado se produce la absorción a sangre a través de las células epiteliales. Para el caso del ^{131}I el 80 % pasa a la circulación sanguínea dos horas después de la ingestión[7, 71]. El yodo es distribuido rápidamente a través de los fluidos extracelulares a los órganos y tejidos. El tiroides y los riñones son los órganos donde más tiempo permanece retenido el yodo. Un tiroides normal puede concentrar yodo entre 20-40 veces del que se concentra en sangre. Aproximadamente el 90 % de la pérdida de yodo del cuerpo es debido a la limpieza renal de la sangre a través de la orina, una pequeña parte se elimina por las heces.

El modelo biocinético del yodo según ICRP 78[7] consiste en 3 compartimentos (ver Figura 3.1), tiroides, sangre y resto del cuerpo. La absorción del yodo en la sangre ocurre durante los primeros momentos posteriores a la incorporación, su comportamiento de absorción es rápido. Una vez distribuido por todo el cuerpo, el 30 % del yodo incorporado permanece en la glándula tiroides, que es el órgano de afinidad del yodo.

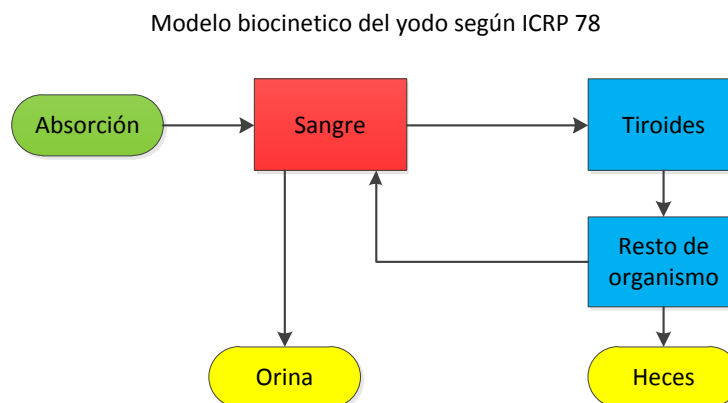


Figura 3.1: Modelo biocinético ICRP 78 para el metabolismo del yodo.

La vida media biológica[72] es el tiempo requerido por un compartimento del sistema biológico para eliminar la mitad del contenido de un radionucleido. En el caso del yodo en el tiroides, dicho periodo depende de la edad, siendo de 15, 23, 58, 67 y 80 días para los niños con edades de 1, 5, 10, 15 años y adulto, respectivamente.

Aunque este es el modelo actual autorizado por el CSN para la estimación de la dosis en tiroides, recientemente se ha actualizado dicho modelo en la publicación ICRP 137[73], pendiente de implementar en la legislación española.

La medida *in vivo* de actividad de ^{131}I retenido en tiroides se realiza con detectores de centelleo sólido NaI(Tl) o con detectores semiconductores de germanio. La medida de concentración de actividad en orina se puede realizar también pero la fracción de excreción decrece muy rápidamente en los primeros días tras la incorporación. Siempre es preferible la medida del tiroides en un Contador de Radiactividad Corporal (CRC); se puede utilizar la medida de orina como método complementario para una mejor determinación del instante de incorporación.

Las personas que pueden recibir exposición interna de ^{131}I son sobre todo trabajadores expuestos a radiaciones, cuyos trabajos implican manipulación de fuentes no encapsuladas que contienen este radionucleido. Además pueden producirse accidentes en centrales nucleares o en instalaciones de medicina nuclear de hospitales (durante tratamientos o pruebas diagnósticas) que pueden dar lugar a exposición interna de miembros del público. La vigilancia de la población expuesta a la incorporación de ^{131}I debe de realizarse en un CRC para poder determinar de forma rápida la actividad incorporada y la dosis asociada, y así valorar la gravedad de la contaminación interna producida.

3.2. Objetivo

El objetivo principal de este capítulo de tesis es garantizar la fiabilidad en los resultados de medida de actividad de ^{131}I en tiroides para miembros del público de diferentes edades y sexo. Para ello se necesita construir unos patrones de calibración simuladores del cuello y tiroides para los grupos de edad de referencia de la publicación ICRP89[56] que representen adecuadamente esa parte del organismo. Previamente a la realización de esta tesis el CRC del CIEMAT disponía únicamente de la calibración para la medida de ^{131}I en tiroides en trabajadores expuestos, obtenida con el maniquí tiroides del hombre adulto. En esta tesis he realizado nuevas calibraciones para niños de 1, 5, 10, 15 años y mujer para los sistemas de detección: (1) detectores LEGe de alta resolución y (2) Contador Fastscan (NaI(Tl)) de alta eficiencia, así como validar las calibraciones y calcular la sensibilidad de detección de la técnica.

3.3. Materiales

3.3.1. Detectores

Los detectores utilizados para la medida de ^{131}I en geometría del tiroides son un detector de semiconductor de germanio (Detector 1) tipo LEGe (Low Energy Germanium) ubicado en el interior de la cámara blindada de bajo fondo radiactivo, y el equipo Fastscan con detectores de NaI(Tl), utilizando uno de sus dos detectores (superior/inferior), dependiendo de la altura del individuo que haya que medir. Ambos equipos están ubicados en el laboratorio del CRC del CIEMAT y descritos en el capítulo 2, en los apartados 2.3.1 y 2.3.2.

3.3.2. Diseño de patrones de calibración de cuello y tiroides

Un patrón de calibración de cuello es un maniquí simulador de cuello y un vial con la fuente radiactiva que simula la contaminación del tiroides humano.

El CRC del CIEMAT dispone del patrón de hombre adulto tipo ANSI de la marca BIODEX[74] (Figura 3.2), que consiste en un cilindro de metacrilato simulando al cuello con un hueco en un lateral en el que se introduce un vial, que simula el tiroides de volumen 20 ml, que es el volumen de tiroides de hombre adulto según norma ANSI N13.44 y recomendaciones de la ICRP[56, 75, 76].



Figura 3.2: Maniquí de cuello y tiroides de adulto tipo ANSI

En este trabajo de tesis he procedido al diseño y fabricación en el CIEMAT de los patrones de cuello y tiroides de niños de 1, 5, 10 y 15 años y mujer adulta. Esto ha permitido obtener calibraciones de los equipos para la medida de radioyodo en tiroides dependiendo de la edad del individuo contaminado y ha evitado tener que utilizar la calibración de adulto en la medida de niños.

En el ejercicio de intercomparación[77] organizado por The Human Monitoring Laboratory (HML) del Canadian National Calibration Reference Center participaron 175 instalaciones de países de todo el mundo, publicándose los resultados en 1996. Para la realización del

ejercicio se construyeron diferentes maniqués por parte de los participantes, simuladores de cuello, cumpliendo las especificaciones de la norma ANSI N13.44[75].

El conjunto de maniqués de cuello como alternativa al maniqué ANSI descrito anteriormente, son el cuello RSD, el maniqué KKH y el BRMD que se describen brevemente a continuación.



Figura 3.3: Maniqué de cuello RSD

El maniqué RSD es un cuello de resina de poliuretano, tiene un hueco para introducir el simulador del tiroides relleno de disolución acuosa, que se cubre con una capa del mismo material. El maniqué KKH consiste en una cáscara en forma cilíndrica de metacrilato en cuyo interior hay un hueco en forma de tiroides que se rellena de líquido; existe en varios tamaños. El maniqué BRMD está fabricado con resina de poliuretano, tiene una cavidad para insertar el simulador de tiroides sólido de 20 ml, con dos placas de diferentes espesores de cuello.

Ante tal variedad de maniqués, con materiales, volúmenes y formas de tiroides diferentes, Kramer llegó a la conclusión en su artículo[77] que los maniqués RSD, BRMD y ANSI son equivalentes desde el punto de vista de la detección/cuantificación cuando las distancias cuello detector son iguales o mayores de 12 cm, y que todos los maniqués-tiroides son equivalentes cuando la distancia es 30 cm o más. Además concluyó que las formas no tienen que ser necesariamente antropomórficas para calibrar los sistemas en distancias cortas.

Esto se ha confirmado en el ejercicio de intercomparación organizado por el Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) de Francia, en el que participa el laboratorio del CRC-CIEMAT. Aquí calibramos con el maniqué de cuello ANSI del hombre adulto y validamos la calibración con la medida del maniqué RSD que envía el IRSN. Los resultados de actividad medida de ^{133}Ba y ^{137}Cs en el maniqué IRSN, analizada con la

calibración obtenida con el maniquí ANSI dan lugar a valores de exactitud < 0.11 [78] (ver Figura 3.4).

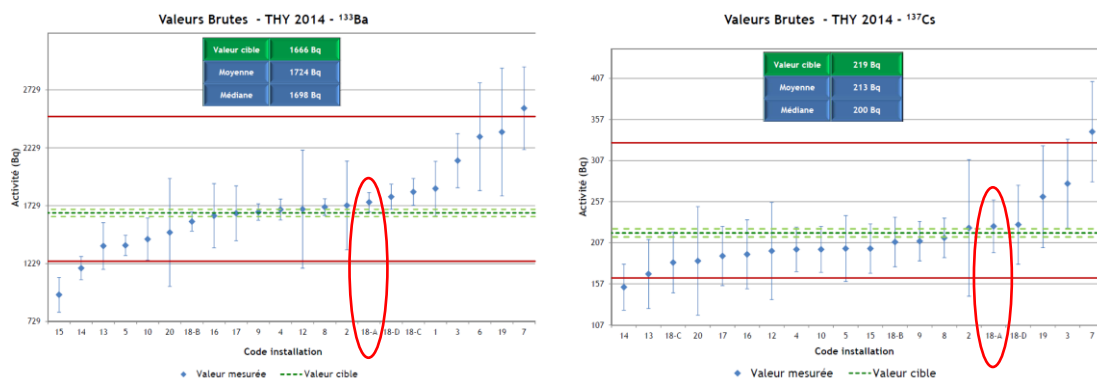


Figura 3.4: Resultados de la exactitud (Br) de ^{133}Ba y ^{137}Cs de la intercomparación de tiroides de IRSN en el año 2014. Fuente: IRSN

3.3.2.1. Consideraciones en el diseño de patrones de cuello y tiroides

En el diseño de los patrones de cuello (ver Figura 3.5) tuve en cuenta una serie de consideraciones, tanto para el maniquí que simula el cuello como para el vial que simula el tiroides.

- La parte posterior del cuello es en su mayoría hueso y es la zona del cuello que va a estar más alejada del detector. El tiroides se encuentra en la parte anterior del cuello, entre los huesos de las cervicales y el detector.
- Entre el tiroides y la piel del cuello hay tejido muscular y tejido adiposo.
- Los viales disponibles para la simulación de las glándulas tiroides eran de diferentes materiales y tamaños.

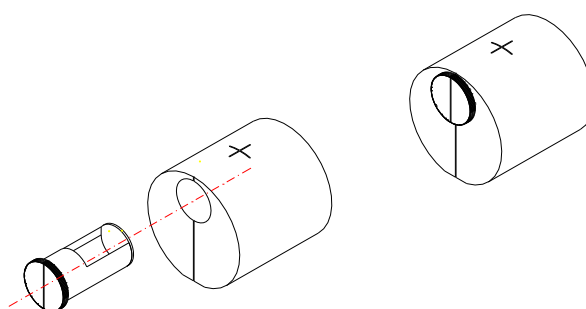


Figura 3.5: Croquis del maniquí simulador de cuello y tiroides, donde se introduce el vial

En el diseño no tuve en cuenta el hueso de las cervicales, puesto que en caso de incorporación, los radioyodos se quedan retenidos en el tiroides y, en general se miden

por la parte anterior, así que, los fotones emisores que pueden llegar al detector solo se van a ver atenuados por el tejido blando del espesor de cuello que hay entre el tiroides y la piel.

El material con el que se fabrique el simulador de cuello ha de tener la densidad y coeficientes de atenuación equivalentes al del tejido blando que compone el cuello humano, y debe de cumplir las especificaciones de la norma ANSI 13.44[75].

3.3.2.2. Maniqués de calibración simuladores de cuellos humanos

3.3.2.2.1. *Material de los maniqués de cuellos*

El material que elegí para la construcción de los cuellos fue metacrilato. Este material está recomendado por la norma ANSI 13.44[75] y la publicación ICRU 44[58], ya que tiene una densidad y un coeficiente de atenuación[79] muy parecidos al del tejido blando humano para la energía de 364 keV, como muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Comparación del coeficiente de atenuación y densidad del tejido blando con el metacrilato para la energía de 364 keV, emisión principal del ^{131}I

	μ/ρ (cm^2/g)	ρ (g/cm^3)
Metacrilato	0.1075	1.1900
Tejido Adiposo	0.1107	0.9500
Tejido muscular	0.1097	1.0500

3.3.2.2.2. *Dimensiones de cuellos*

Teniendo en cuenta las dimensiones del cuello ANSI de hombre, en los diseños de los cuellos de 1, 5, 10 y 15 años, el diámetro y la altura de cuello se consideraron de igual longitud.

En primer lugar, realicé un estudio del perímetro de cuello de niños de diferentes edades. El muestreo fue de 13 niños y niñas con edades comprendidas entre 6 meses y 15 años, se midió el perímetro del cuello con una incertidumbre asociada a la medida de 0.5 cm (ver Tabla 3.2). Estos valores del perímetro del cuello y su incertidumbre se representaron gráficamente frente a la edad, obteniendo unos puntos que se ajustaron a una regresión lineal, obteniendo una recta como la que se ve en la Figura 3.6.

Tabla 3.2: Valores de perímetro de cuello para diferentes edades

Sexo	Edad (años)	Perímetro (cm)
F	0.5	21.5 ± 0.5
F	1.3	23.0 ± 0.5
M	2.5	26.0 ± 0.5
M	3	23, 0 ± 0.5
F	4	24.5 ± 0.5
F	5	25.0 ± 0.5
M	5	26.0 ± 0.5
M	5	26.0 ± 0.5
M	7	27.5 ± 0.5
F	8	27.0 ± 0.5
F	10	29.0 ± 0.5
M	15	31.5 ± 0.5
M	15	38.5 ± 0.5

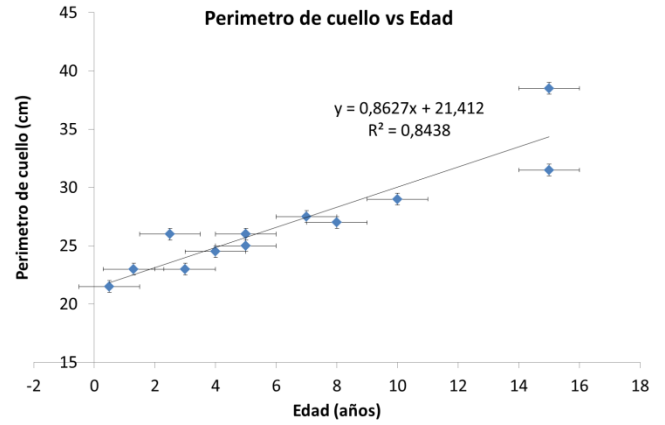


Figura 3.6: Representación del perímetro de cuello para diferentes edades.

Las incertidumbres asociadas a la recta, de la pendiente y de la abscisa se calcularon con la ecuación 3.1 y la ecuación 3.2, respectivamente. La ecuación 3.3 representa el ajuste lineal, la pendiente y abscisa junto a sus respectivas incertidumbres, permite relacionar el perímetro del cuello con la edad.

$$\Delta a = \sqrt{\frac{n}{n-2} \cdot \frac{\sum_1^n (y_i - ax_i - b)^2}{n \cdot \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2}} \quad (3.1)$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \frac{\sum_1^n (y_i - ax_i - b)^2}{n \cdot \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2} \sum_1^n x_i^2} \quad (3.2)$$

$$P(\text{cm}) = (0.86 \pm 0.20) \cdot E(\text{años}) + (21.4 \pm 1.6) \quad (3.3)$$

El perímetro del cuello en cada una de las edades consideradas (1, 5, 10 y 15 años) se obtuvo a partir de la recta (ecuación 3.3).

Los cuellos los diseñé como un cilindro, y el diámetro de la base se calculó a partir del perímetro con la ecuación 3.4. Los valores del perímetro y de la altura[80] con sus respectivas incertidumbres para las diferentes edades consideradas se muestran en la Tabla 3.3.

$$D = \frac{P}{\pi} ; \quad \Delta D = \frac{\Delta P}{\pi} \quad (3.4)$$

Tabla 3.3: Dimensiones de cuello calculadas para la diseñar el cuello simulador de metacrilato para los niños con edades de 1, 5, 10, y 15 años.

Edad (año)	Perímetro (cm)	Altura (cm)
1	22 ± 2	7.1 ± 0.6
5	26 ± 3	8.2 ± 0.9
10	30 ± 4	10 ± 1
15	34 ± 5	11 ± 2

3.3.2.3. Glándula tiroides

3.3.2.3.1. *Material del tiroides*

Los viales que se disponían para los diferentes volúmenes estaban fabricados con diferentes materiales: polietileno, poliestileno y vidrio. Las densidades y coeficientes de atenuación son diferentes para cada caso, por lo que los fotones de la fuente de ^{131}I sufren ligera diferencia en las atenuaciones[79].

3.3.2.3.2. *Dimensiones de la glándula tiroides*

La simulación de la contaminación de la glándula tiroides se realizó con un vial en forma cilíndrica. El recipiente simulador del tiroides consistía en un vial con capacidad ligeramente superior al volumen del tiroides, para evitar derrames por el llenado de la fuente radiactiva situada en su interior. Los volúmenes del tiroides para las diferentes edades recomendados por la publicación ICRP89[56] se pueden ver en la Tabla 3.4 y junto con las especificaciones de la norma ANSI 44.3[76] fueron la bases para el diseño de los simuladores de tiroides.

Tabla 3.4: Volúmenes del tiroides según las recomendaciones de la publicación ICRP 89.

Edad	V tiroides (ml)
Recién nacido	1.3
1 año	1.8
5 años	3.4
10 años	7.9
15 años	12
Mujer	17
Hombre	20

Las dimensiones de cada vial y el material del que están fabricados se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Materiales y dimensiones de los recipientes que simulan el tiroides en las diferentes edades.

Edad	Material	V recipiente (ml)	V fuente ^{131}I (ml)	h (cm)	Diámetro (cm)
1 año	Poliestileno	1.9	1.8	5	1.4
5 años	Polietileno	7	3.4	5.7	1.6
10 años	Vidrio	7.9	7.7	5.9	1.7
15 años	Poliestileno	15	12	4.8	3.1
Mujer	Polietileno	20	17	6.1	2.7
Hombre	Polietileno	30	20	7.2	3

3.3.2.4. Dimensiones del espesor del cubre-tiroides

Los niños recién nacidos tienen un cuello corto, simétrico, flexible, con pliegues profundos de tejido adiposo. A partir de 2 años el cuello se va haciendo más esbelto y fuerte ya que la proporción muscular va aumentando. Los músculos de cuello generalmente no están desarrollados totalmente hasta los 14 años[81]. En la parte anterior del tiroides hay varios tejidos, desde el más profundo al más externo son: la fascia del tiroides, una capa muscular, otra adiposa y la piel[70], todos ellos se consideran tejido blando. Aunque los tejidos muscular y adiposo tienen el coeficiente de atenuación y densidad muy parecidos, a la hora de calcular las atenuaciones producidas por cada una de las capas los resultados diferían ligeramente.

3.3.2.4.1. Estudio grosor de cuello

El espesor de cuello se midió en 12 imágenes axiales de Tomografía Computarizada (TC) de cuello de niños de diferentes edades, cedidas por el hospital Universitario de La Paz. Se visualizaban a través del software IQview, que permite utilizar diferentes herramientas para agrandar y aplicar diferentes filtros y colores con el fin de visualizar mejor los diferentes tejidos. En la Figura 3.7 se ve un óvalo azul que es la tráquea, junto a él está el tiroides y desde el tiroides hasta la piel se visualizan dos tejidos, muscular y adiposo. Medí los grosores de los tejidos muscular y adiposo de la cara anterior del cuello de todas las imágenes, los resultados de las medidas se muestran en la Tabla 3.6.

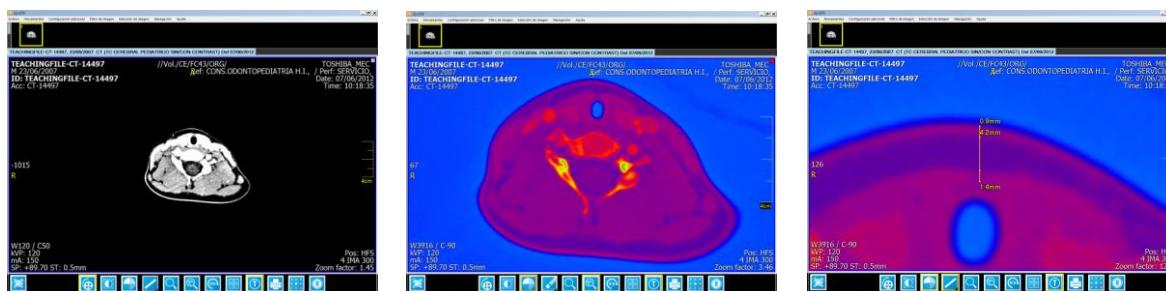


Figura 3.7: Imagen de TC axial de cuello a la altura del tiroides de niño de 5 años visto con IQview.

El grosor de cada uno de los tejidos se puede ver en las imágenes TC con corte axial de cuello a la altura de la glándula tiroidea. Se distinguen diferentes partes del cuello: la piel, el tejido adiposo, el tejido muscular, la glándula tiroidea, el hueso cervical, las venas y las arterias, la tráquea y el esófago como se muestra en la Figura 3.8. En la parte anterior del cuello se aprecian diferentes músculos que se superponen y cruzan en la parte anterior del tiroides, junto a estos se ve una capa de tejido adiposo que está cubierta por la piel. Desde el tiroides a la piel existe una capa muscular y otra adiposa. La proporción de cada una de ellas varía para cada persona.

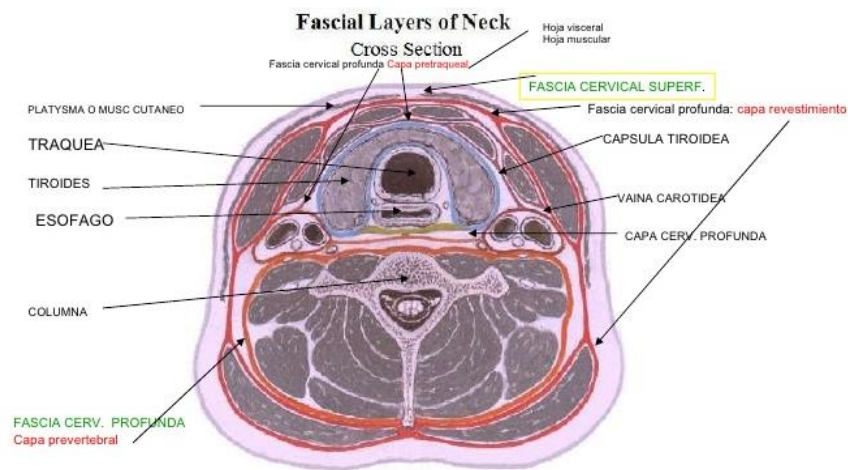


Figura 3.8: Imagen TC: corte axial del cuello a la altura del tiroides, se ven los diferentes tejidos. <http://image.slidesharecdn.com/viscerasdelcuello2-110114222703-phpapp01/95/visceras-del-cuello2-4-1024.jpg?cb=1295065697>

Cada persona tiene diferente proporción de los tejidos adiposo y muscular, y depende, entre otros factores: de la edad, el sexo y la constitución física. Los valores de los grosores de tejidos obtenidos se representan gráficamente en función de la edad, ver la Figura 3.9. El ajuste de los puntos es una regresión lineal obteniendo una relación entre el espesor del tejido y la edad. En cada caso se calcula las proporciones de cada tejido, la media es del 70 % para tejido adiposo y del 30 % para tejido muscular, ver Tabla 3.6.

La incertidumbre asociada a cada medida es 0.3 mm, debida al tamaño del pixel de la imagen. En la media de cada tejido las incertidumbres se calcularon a partir de la pendiente y ordenada de la recta (ecuaciones 3.1 y 3.2), y con la incertidumbre combinada (ecuación 3.5) se calculó la incertidumbre del espesor de cuello.

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_m^2} \quad (3.5)$$

Tabla 3.6: Resultados de las medidas de los espesores de los diferentes tejidos de las imágenes de TC.

Imagen	Edad (años)	Sexo	Grosor adiposo (mm)	Grosor muscular (mm)	Cubre-tiroides (mm)	Proporción adiposo	Proporción muscular
CT14477	0.25	M*	4.2 ± 0.3	0.8 ± 0.3	5.0 ± 0.4	0.8400	0.1600
CT14478	1.13	H*	2.8 ± 0.3	1.8 ± 0.3	4.6 ± 0.4	0.6087	0.3913
CT14493	1.25	H*	3.7 ± 0.3	1.1 ± 0.3	4.8 ± 0.4	0.7708	0.2292
CT14494	1.49	M*	3.0 ± 0.3	1.5 ± 0.3	4.5 ± 0.4	0.6667	0.3333
CT14490	2.33	H*	3.1 ± 0.3	2.0 ± 0.3	5.1 ± 0.4	0.6078	0.3922
CT14491	3.17	H*	3.7 ± 0.3	1.3 ± 0.3	5.0 ± 0.4	0.7400	0.2600
CT14496	5.22	H*	4.6 ± 0.3	2.0 ± 0.3	6.6 ± 0.4	0.6970	0.3030
CT14498	8.04	H*	6.1 ± 0.3	2.3 ± 0.3	8.4 ± 0.4	0.7262	0.2738
CT14499	10.96	H*	7.5 ± 0.3	2.1 ± 0.3	9.6 ± 0.4	0.7813	0.2188
CT14500	13.68	H*	5.8 ± 0.3	3.8 ± 0.3	9.6 ± 0.4	0.6042	0.3958
Promedio						0.6985	0.3015

*M mujer; H hombre

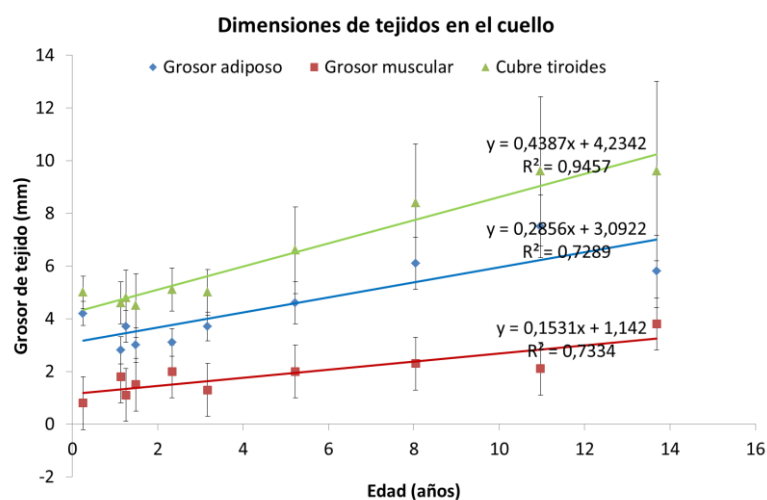


Figura 3.9: Relación de los grosores de los tejidos adiposo y muscular en el cuello en función de la edad.

Las ecuaciones que relacionan el grosor de cuello para los tejidos adiposo, muscular y del total son las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8.

$$X_{adiposo}(mm) = (0.29 \pm 0.07) \cdot E(\text{años}) + (3.1 \pm 0.4) \quad (3.6)$$

$$X_{musculo}(mm) = (0.15 \pm 0.06) \cdot E(\text{años}) + (1.14 \pm 0.04) \quad (3.7)$$

$$X_{adiposo+musculo}(mm) = (0.4 \pm 0.2) \cdot E(\text{años}) + (4.2 \pm 0.6) \quad (3.8)$$

A partir de estas ecuaciones, se extrapolan los valores de los espesores de cada tejido para las edades consideradas de 1, 5, 10 y 15 años, ver Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Espesores de los diferentes tejidos en el cuello para diferentes edades.

Edad	Grosor tejido adiposo (mm)	Grosor tejido muscular (mm)	Cubre-tiroides (mm)
1 año	3.4 ± 0.5	1.3 ± 0.1	4.7 ± 0.8
5 años	4.5 ± 0.8	1.9 ± 0.3	6 ± 2
10 años	6 ± 1	2.7 ± 0.6	9 ± 3
15 años	7 ± 1	3.4 ± 0.9	11 ± 4

3.3.2.4.2. Atenuación en el tejido blando del cuello

Los radionucleidos emisores gamma retenidos en el organismo emiten fotones que se atenúan cuando atraviesan los órganos y tejidos que se encuentran en su camino. Para el caso concreto del ^{131}I , que se retiene en el tiroides, los fotones tienen que atravesar las capas de tejidos muscular y adiposo del cuello hasta salir al exterior del organismo. La atenuación producida debe de ser la misma que se ha de producir en el patrón simulador. La atenuación lineal y su incertidumbre se calculan con la ecuación 3.9 y ecuación 3.10, respectivamente.

$$I = I_0 * e^{-\mu x} = I_0 * e^{-\left[\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \cdot x\right]} \quad (3.9)$$

$$\Delta\left(\frac{I}{I_0}\right) = \left|\frac{\partial\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\partial x}\right| \cdot \Delta x = \left|-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \cdot e^{-\left[\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \cdot x\right]}\right| \cdot \Delta x \quad (3.10)$$

Dónde:

I es la intensidad de salida del material

I_0 es la intensidad de entrada al material

ρ es la densidad del material [g/cm^3]

x es el espesor de la materia que atraviesan los fotones [cm]

μ/ρ es el coeficiente de atenuación[79] [cm^2/g], depende de la energía. Se calculó para la emisión principal de ^{131}I , en 364 keV, como se muestra en la Tabla 3.8. Las tablas de coeficientes de atenuación dan los valores para las energías de 300 keV y de 400 keV. El cálculo se realizó a partir de la ponderación de la energía para los tejidos adiposo y muscular, así como de los materiales de los viales y del patrón de cuello.

Tabla 3.8: Cálculo del coeficiente de atenuación para la energía de 364 keV.

E=364 keV	μ/ρ (E=300keV) (cm^2/g)	μ/ρ (E=400keV) (cm^2/g)	μ/ρ (E=364keV) (cm^2/g)	ρ (g/cm^3)
Adiposo	0.1187	0.1062	0.1107	0.9500
Musculo	0.1176	0.1052	0.1097	1.0500
Metacrilato	0.1152	0.1031	0.1075	1.1900
Polietileno	0.1217	0.1089	0.1135	0.9300
Poliestileno	0.1147	0.1027	0.1070	1.0600
Vidrio	0.1069	0.0954	0.0995	2.2300

Para calcular las atenuaciones de los tejidos hay que tener en cuenta el grosor de las capas adiposa y muscular de cuello de los niños de 1, 5, 10, y 15 años, que son atravesadas por los fotones de ^{131}I , en la emisión principal en la energía de 364 keV. Las incertidumbres de la atenuación para cada tejido se calcularon a partir de la ecuación 3.10. La incertidumbre de la atenuación del grosor de cuello se calculó a partir de las incertidumbres de la atenuación de los tejidos muscular y adiposo con la ecuación 3.5 de la incertidumbre combinada. Los resultados de la atenuación obtenidos debido al espesor de cuello para cada edad considerada, se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Valores de la atenuación para el espesor de tejido blando del cuello.

Atenuación	Niño 1 año (cm^2/g)	Niño 5 años (cm^2/g)	Niño 10 años (cm^2/g)	Niño 15 años (cm^2/g)
Adiposo	0.965 ± 0.006	0.95 ± 0.03	0.94 ± 0.01	0.93 ± 0.01
Muscular	0.985 ± 0.001	0.978 ± 0.007	0.969 ± 0.002	0.96 ± 0.01
Total	0.95 ± 0.08	0.94 ± 0.02	0.91 ± 0.03	0.89 ± 0.04

3.3.2.4.3. Espesores de cuellos en los maniqués

Los espesores de los patrones de cuello se calcularon a partir de la atenuación producida en cada uno de ellos, que se consideró la misma que la producida en el metacrilato y el vial juntos. Los viales eran de diferentes materiales y dimensiones, sus propiedades de densidad y coeficientes de atenuación eran también diferentes por lo que en cada caso se producían atenuaciones diferentes. El grosor de las paredes de los viales se consideró igual en todos los casos: 1.0 ± 0.5 mm. Los resultados de las atenuaciones se muestran en la Tabla 3.9 y a partir de aquí se calcularon los espesores del metacrilato necesario para simular cada caso. La incertidumbre de la atenuación del metacrilato se calculó a partir de la incertidumbre de la atenuación del vial y del tejido blando en cada caso, según la ecuación 3.11. La incertidumbre del espesor de metacrilato se calculó teniendo en cuenta la atenuación debida al tejido blando y al grosor del vial, a partir de la ecuación 3.12.

$$\Delta Am = \left| \frac{1}{A_V} \right| \Delta A_R + \left| \frac{A_R}{A_V^2} \right| \Delta A_V \quad (3.11)$$

$$\Delta(x') = \left| \frac{\partial x'}{\partial \left(\frac{I}{I_0}\right)} \right| \cdot \Delta\left(\frac{I}{I_0}\right) = \left| \frac{1}{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \cdot e^{-\left[\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \cdot x\right]}} \right| \cdot \Delta\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.12)$$

Tabla 3.10: Cálculo del grosor de cuello de metacrilato teniendo en cuenta el grosor del vial.

Edad	Material Vial	Atenuación vial	Atenuación metacrilato	Atenuación total	x (cm)
1 año	Poliestileno	0.989 ± 0.006	0.961 ± 0.009	0.95 ± 0.08	0.3 ± 0.1
5 años	Polietileno	0.989 ± 0.005	0.95 ± 0.04	0.94 ± 0.02	0.31 ± 0.03
10 años	Vidrio	0.98 ± 0.01	0.93 ± 0.02	0.91 ± 0.03	0.59 ± 0.04
15 años	Poliestileno	0.989 ± 0.006	0.90 ± 0.02	0.89 ± 0.04	0.84 ± 0.06

La Tabla 3.11 muestra la equivalencia de los espesores de cuello humano con el cuello de metacrilato. Los espesores de metacrilato calculados se encontraban entre 2-8 mm. Kramer en su artículo[82] *The BMRD thyroid-neck phantom: design and construction* sobre el diseño y construcción del maniquí de cuello BMRD expuso que los valores de espesor de los simuladores de cuellos estaban entre 0.2-4 cm.

Tabla 3.11: Espesores equivalentes de cuello de tejido blando y con metacrilato-vial.

Edad	Cubre-tiroides (mm)	Espesor metacrilato-vial (mm)
1 año	4.7 ± 0.8	3 ± 1
5 años	6 ± 2	3.1 ± 0.3
10 años	9 ± 3	5.9 ± 0.4
15 años	11 ± 4	8.4 ± 0.6

3.3.2.5. Construcción de maniqués de cuello

Los maniqués de cuello de niños de 1, 5, 10 y 15 años, cuyo croquis se muestra en la Figura 3.5, fueron construidos en los talleres del CIEMAT, a partir del diseño que yo elaboré teniendo en cuenta los resultados del estudio presentado anteriormente. Cada uno de ellos consistía en un cilindro cuyo perímetro coincidía con los valores calculados para las edades de 1, 5, 10 y 15 años. Teniendo en cuenta el cuello BIODIX de hombre adulto, se construyeron con la altura igual a su respectivo diámetro de cuello. La parte posterior se truncó para poder posicionar correctamente el cuello en geometría de detección tipo silla o de cubito supino y evitar que se moviera debido a la forma circular de la pieza. La parte anterior consta de un hueco cilíndrico, en el que se introduce otro cilindro, más pequeño, que alberga el vial simulador de la contaminación del tiroides (ver Figura 3.5).

3.3.3. Maniqués de cuello y tiroides

El Contador de Radiactividad Corporal del CIEMAT, gracias a este trabajo, dispone de una familia de patrones de calibración simuladores de cuello junto con viales que representan la contaminación del tiroides por yodo radiactivo, en función de la edad del individuo expuesto, cuyas dimensiones y materiales se basan en las recomendaciones de la publicación ICRP 89[56] y en la norma ANSI 13.44, (Tabla 3.12.)

- Maniquí persona adulta

El maniquí de calibración utilizado para hombre y mujer adultos es comercial, de la marca Biodex, está propuesto por el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) y sigue las recomendaciones de la norma ANSI 13.44[75] publicada por “ANSI-American National Standards Institute”. El material de fabricación es de metacrilato, sus dimensiones de diámetro y altura son 127 x 127 cm, con un hueco para introducir el simulador del tiroides, con dimensiones de 5 cm de diámetro y altura 10 cm (ver Tabla 3.12), suficiente para introducir un vial de 20 ml. El espesor de cuello que han de atravesar los fotones gamma es de 5 mm.

- Maniquí de niños

El conjunto de maniqués de calibración para niños de 1, 5, 10 y 15 años se fabricaron con metacrilato en los talleres del CIEMAT, como parte del trabajo de esta tesis doctoral. Las dimensiones[80] (perímetro, diámetro, altura de las diferentes piezas y el espesor del cuello) y sus incertidumbres se muestran en la Tabla 3.12. El cilindro extraíble tiene capacidad para poder albergar el vial correspondiente a cada una de las edades. Dicho vial relleno con una disolución acuosa con el isótopo de interés permite simular el tiroides contaminado por yodo radiactivo. La familia de maniqués simuladores de cuellos con sus viales en el interior se muestra en la Figura 3.10.

Tabla 3.12: Dimensiones de los maniqués de cuello fabricados para y utilizados en el laboratorio del CRC-Ciemat, para las diferentes configuraciones (adulto, niños de 15, 10, 5 y 1 año).

Edad	Perímetro (mm)	ϕ cilindro grande (mm)	H cilindro grande (mm)	ϕ cilindro pequeño (mm)	H cilindro pequeño (mm)	Espesor cuello (mm)
1 año	220 ± 2	71.0 ± 0.5	71.0 ± 0.5	21.0 ± 0.5	63.0 ± 0.5	2.1 ± 0.5
5 años	260 ± 3	82.0 ± 0.5	82.0 ± 0.5	23.0 ± 0.5	72.0 ± 0.5	3.0 ± 0.5
10 años	300 ± 4	95.0 ± 0.5	96.0 ± 0.5	24.0 ± 0.5	79.0 ± 0.5	4.2 ± 0.5
15 años	340 ± 5	108.0 ± 0.5	109.0 ± 0.5	40.0 ± 0.5	80.0 ± 0.5	5.4 ± 0.5
Adulto	410 ± 5	127.0 ± 0.5	127.0 ± 0.5	50.0 ± 0.5	100.0 ± 0.5	5.0 ± 0.5

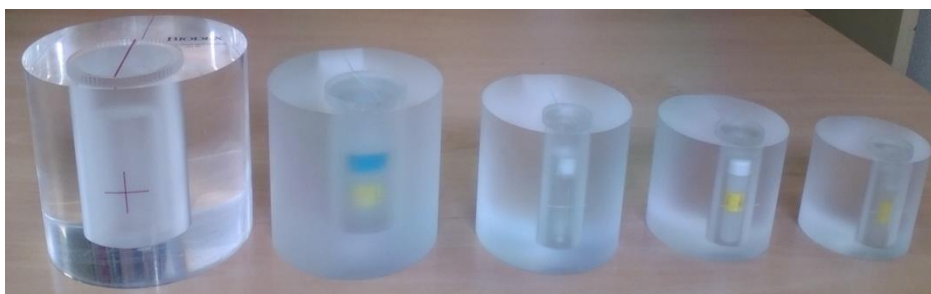


Figura 3.10: Patrones de metacrilato simuladores de cuellos, de izquierda a derecha, adulto, niños de 15, 10, 5 y 1 año, fabricados en CIEMAT durante el desarrollo de esta tesis doctoral. En el interior el vial simulador del tiroides.

3.3.4. Fuentes de calibración

- El isótopo ^{131}I

La forma química de ^{131}I es la unión de dos átomos de yodo produciendo una molécula de yodo, I_2 . Es emisor de radiación γ y rayos X con unas energías están dadas en la Tabla 3.13 que se tomaron de las bases de datos de Nuclear Data[83].

El ^{131}I se produce en grandes cantidades en las plantas nucleares, y se utiliza en medicina nuclear para diagnóstico y tratamientos de tiroides.

La fuente de ^{131}I tiene un periodo de semidesintegración de pocos días (8.02 días), que puede resultar insuficiente cuando se necesita calibrar, por eso existe un simulador del ^{131}I que consiste en una combinación de dos fuentes radiactivas de ^{133}Ba y ^{137}Cs , con una proporción en actividad de 90 % y 10 %, respectivamente. Sus emisiones energéticas[83] son similares a las del ^{131}I y con intensidades de emisión, en general, muy parecidas, y tienen la ventaja que el periodo de semidesintegración es más largo, 10.51 años para el ^{133}Ba y 30 años para el ^{137}Cs (ver Tabla 3.14).

Tabla 3.13: Emisiones X y γ e intensidades de emisión de los radionucleidos ^{131}I , ^{133}Ba y ^{137}Cs , están señalados los más utilizados. Obtenidos de <http://nucldata.nuclear.lu.se>

^{131}I (8.01 d)		^{133}Ba (10.51 y)		^{137}Cs (30.07 y)	
E (keV)	Ie (%)	E (keV)	Ie (%)	E (keV)	Ie (%)
3.633	0.0086	3.795	0.24	3.954	0.0143
3.955	0.004	4.142	0.11	4.331	0.0064
4.093	0.024	4.272	0.66	4.451	0.04
4.105	0.215	4.286	6	4.466	0.36
4.414	0.133	4.62	3.8	4.827	0.226
4.451	0.0127	4.649	0.56	4.852	0.023
4.512	0.021	4.717	0.93	4.927	0.039
4.569	0.0017	4.781	0.048	4.994	0.003
4.714	0.042	4.934	1.19	5.156	0.074
5.034	0.0186	5.281	0.54	5.531	0.033
5.307	0.0033	5.542	0.15	5.797	0.0065
5.307	0.0049	5.553	0.22	5.809	0.0093
29.112	0.000143	30.27	0.00401	31.452	0.000263
29.461	1.4	30.625	34.9	31.817	2.04
29.782	2.59	30.973	64.5	32.194	3.76
33.562	0.238	34.92	5.99	36.304	0.352
33.624	0.459	34.987	11.6	36.378	0.68
33.881	0.00467	35.252	0.123	36.652	0.0079
34.419	0.139	35.818	3.58	37.255	0.215
34.496	0.0269	35.907	0.74	37.349	0.0481
80.185	2.62	53.161	2.199	283.53	0.00058
85.9	0.00009	79.6139	2.62	661.657	85.1
163.93		80.9971	34.06		
177.214	0.27	160.613	0.645		
232.18	0.0032	223.234	0.45		
272.498	0.0578	276.398	7.164		
284.305	6.14	302.853	18.33		
295.8	0.0018	356.017	62.05		
302.4	0.0047	383.851	8.94		
318.088	0.0776				
324.651	0.0212				
325.789	0.274				
358.4	0.016				
364.489	81.7				
404.814	0.0547				
503.004	0.36				
636.989	7.17				
642.719	0.217				
722.911	1.773				

- Viales para la calibración en eficiencias

En el presente trabajo, las fuentes radiactivas utilizadas son similares a las propuestas por la norma ANSI 13.44, en forma de disolución líquida dentro de un vial con forma cilíndrica. Los volúmenes de las fuentes están basados en la publicación ICRP 89[56], para cada franja de edad y se pueden ver en la Tabla 3.4. Los viales utilizados tienen volúmenes ligeramente superiores a los de las fuentes (ver Tabla 3.14), excepto para el caso del niño de 10 años, el volumen de referencia del tiroides es de 7.9 ml, igual que el

del vial, por lo que se rellenó el vial con un volumen de 7.7 ml para que se pueda cerrar correctamente sin que haya derrames de la fuente radiactiva líquida y evitar una posible contaminación. La fuente de ^{131}I está diluida en una disolución ácida con el fin de minimizar la permanencia del radionucleido en la pared del vial y la distribución sobre el mismo sea lo más homogénea posible.

Tabla 3.14: Volúmenes (V) de la fuente de ^{131}I utilizadas para las edades de 1, 5, 10, 15 años, mujer y hombre adulto.

Edad	V tiroides (ml)	V vial (ml)
1 año	1.8	1.9
5 años	3.4	6
10 años	7.7	7.9
15 años	12	15
Mujer	17	20
Hombre	20	30

La Figura 3.11 muestra las fuentes para la calibración de ^{131}I en tiroides, en la que se puede apreciar la diferencia entre los viales: de izquierda a derecha son los viales de hombre y mujer adultos, y de personas de 15, 10, 5 y 1 años. Todas estas fuentes de calibración se generaron y certificaron en el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del CIEMAT, que emitió un certificado para cada una de ellas con la actividad e incertidumbre así como los volúmenes de cada fuente. Todas están referenciadas con un código único, y los datos están recogidos en la Tabla 3.15.



Figura 3.11: Viales simuladores de la contaminación del tiroides con ^{131}I (de izquierda a derecha) para hombre y mujer adultos, 15, 10, 5 y 1 año.

Tabla 3.15: Actividades (A) de las fuentes con ^{131}I introducidas en cada uno de los viales de volumen V

Fecha de referencia	Referencia de fuentes de ^{131}I	Edad (años)	A Certificada (kBq)	ΔA (kBq) 2 % k=2	V (ml)
10/07/2015	FRC2015-00417	1	29.46	0.59	1.8
10/07/2015	FRC2015-00418	5	29.79	0.6	3.4
10/07/2015	FRC2015-00419	10	59.5	1.2	7.7
10/07/2015	FRC2015-00420	15	49.9	1	12
31/10/2014	FRC2014-00382	Mujer	40.6	1.2 (2.8 %)	17
10/07/2015	FRC2015-00421	Hombre	18.81	0.38	20

- Viales para la validación de la calibración en eficiencias

El Laboratorio de Metrología del Ciemat preparó una fuente de ^{133}Ba y ^{137}Cs (simuladora de las emisiones de ^{131}I) en disolución acuosa, de referencia FRC-2016-00462, con actividades de 50.4 ± 0.8 kBq y 5.0 ± 0.2 kBq respectivamente, en la fecha 18 de marzo de 2016. A partir de esta fuente, se prepararon en el Laboratorio de Bioeliminación del Ciemat una serie de nuevos viales similares a los utilizados para la calibración, escalados por edades, pero con ^{133}Ba y ^{137}Cs , con las características que se muestran en la Tabla 3.16 el día 6 de abril de 2016. Dichos viales se midieron para la obtención de la actividad equivalente de ^{131}I (obtenida a partir de las emisiones de ^{133}Ba y ^{137}Cs) y compararla con la actividad de referencia, como parte del proceso de validación de la calibración en eficiencias obtenida con las fuentes de yodo.

Tabla 3.16: Actividades de los viales de ^{133}Ba y ^{137}Cs , simuladores de las emisiones de ^{131}I en tiroides, utilizados para validar las calibraciones.

V (ml)	Referencia	A (Bq) ^{133}Ba 06/04/2016	A (Bq) ^{137}Cs 06/04/2016
1.8	1	9490 ± 20	945 ± 20
3.4	2	9486 ± 20	944 ± 20
7.6	3	9526 ± 20	948 ± 20
12	4	9563 ± 20	951 ± 20
17	5	9521 ± 20	947 ± 20

3.4. Método de calibración de ^{131}I en tiroides

La determinación de la contaminación en el interior del organismo humano consiste en identificar y cuantificar la actividad de los radionucleidos incorporados a través de medidas sobre el individuo en un Contador de Radiactividad Corporal (CRC), o a través de medidas de concentración de actividad en excretas realizadas en un laboratorio de Bioeliminación. Las primeras son medidas *in-vivo* y consisten en posicionar un detector sobre el tejido, órgano o todo el organismo que se quiera medir, para que pueda detectar la radiación X y/o γ de los radionucleidos retenidos en el interior del cuerpo, que emiten fotones capaces de salir al exterior del organismo y alcanzar el detector.

Cada radionucleido tiene un órgano o tejido de afinidad, de forma que va a permanecer retenido en él de forma preferente y durante más tiempo que en el resto del organismo y es en general, el más adecuado para medir.

El laboratorio del CRC del CIEMAT disponía de calibraciones para hombre adulto con el detector 1 del sistema LEGe y en el contador Fastscan[84, 85], ya que la mayoría de las medidas de ^{131}I en tiroides se realizan para trabajadores expuestos. En el accidente de la

central nuclear de Fukushima Daiichi, las medidas realizadas en el tiroides a personas con distintas edades y tamaños fueron analizadas con la calibración de hombre adulto. Fue cuando se identificó la necesidad de mejorar las capacidades de los contadores de radiactividad corporales para la medida de actividad de ^{131}I [23] en tiroides, calibrando con fuentes patrón (maniqués) de acuerdo a los diferentes grupos de población, y mejorar así la estimación de dosis. En este trabajo he realizado nuevas calibraciones en tiroides para miembros del público: adultos, niños de 1, 5, 10 y 15 años.

3.5. Resultados y discusión

Las medidas *in vivo* se realizan para determinar la actividad retenida en el organismo debido a la exposición interna. En el caso de incorporación de yodo radiactivo las medidas de tiroides se analizan con las calibraciones previas que se realizan con patrones simuladores del cuello-tiroides con una geometría, posición relativa y distancia del órgano o tejido con respecto al detector reproducible para las personas.

En el espectro resultante de la medida se observan los diferentes fotopicos de las emisiones de radiación X y γ de la contaminación interna del individuo. En la identificación y cuantificación de los fotopicos de un espectro se tiene en cuenta las calibraciones previas realizadas en energía/FWHM y eficiencia, respectivamente.

3.5.1. Estudio previo de medidas de ^{131}I en tiroides con el detector LEGe

Las medidas de los maniqués cuellos escalados por edad con los viales correspondientes simulando la contaminación del tiroides con ^{131}I se analizaron con la eficiencia del hombre adulto para calcular la actividad (Bq) del ^{131}I . Estos valores se compararon con la actividad de referencia (conocida) en el vial, para saber cuál es la desviación producida al medir diferentes personas con la calibración de hombre adulto.



Figura 3.12: Maniqués de cuello de metacrilato delante están sus respectivos viales de izquierda a derecha simulan a hombre y mujer adultos, 15, 10, 5 y 1 año, fueron los utilizados en la calibración y en la validación.

3.5.1.1. Actividades de maniqués de cuello-tiroides de distintas edades medidas con detector LE Ge y analizadas con la eficiencia de tiroides de hombre adulto

Realicé medidas con los patrones de cuello-tiroides de cada una de las configuraciones de 1 año, 5, 10, 15 años y mujer adulta con el detector 1 del sistema LE Ge, con la misma geometría de calibración de hombre adulto. Se posicionaron los cuellos centrando el tiroides bajo el detector a una **distancia de 15 cm**, el tiempo de medida fue de 1200 s.

Los espectros obtenidos en cada una de las medidas de los simuladores de tiroides de distintas edades, se analizaron con la eficiencia de hombre adulto, con el fin de cuantificar la actividad del ^{131}I (ecuación 2.9). Las actividades resultantes se compararon con las actividades de referencia a través del parámetro exactitud, que se calculó según la norma ISO 28218[59], con la ecuación 2.5, teniendo en cuenta la actividad medida y la actividad de referencia de la fuente, calculada a partir de la ecuación del decaimiento, ecuación 2.4, para el día de la medida.

Los resultados de las actividades obtenidas en las diferentes configuraciones, las actividades de referencia de cada una de ellas en la fecha de la medida, el cálculo de la exactitud y la precisión (ecuación 2.7) de las medidas se muestran en la Tabla 3.17.

Se observó que existían diferencias de actividades más elevadas para los simuladores de cuellos más pequeños debidos, sobre todo, a la diferencia del volumen de la fuente.

En la exactitud (Bri) se obtuvieron desviaciones que oscilaban, dependiendo del patrón de cuello que se había medido, en torno al 35 %, 27 %, 22 % y 8 % para los niños de 1, 5, 10 y 15 años respectivamente y un 6 % para mujer adulta, ver la Figura 3.13. Todas las exactitudes estaban dentro del margen de aceptación según la norma ISO 28218, [-0.25, 0.50], aunque para los patrones de cuello de niños más pequeños (1, 5 y 10 años) está clara la justificación de disponer de una calibración específica para cada edad y así mejorar los resultados de las actividades medidas. Para los casos de la mujer y niño de 15 años no sería necesario calibrar puesto que las diferencias en la exactitud eran menores de un 10 %. Se consideró que una nueva calibración en todas las configuraciones podría ser positiva y útil para comprobar las variaciones y disponer de la eficiencia para los diferentes tamaños del patrón de tiroides.

Tabla 3.17: Medidas realizadas con los maniqués en el detector 1 del sistema LGe, analizadas con la calibración de hombre estándar para la energía de 364 keV, Exactitu y precisión de las actividades medidas de niños, mujer y hombre analizados con eficiencia de calibración de hombre en el detector 1 LGe.

Espectro	Edad (a)	V (ml) fuente	A(Bq) Referencia	A (Bq) Medida	ΔA (Bq) Medida	Bri	Exactitud (Br)	Precisión (SBr)
36104123	1	1.8	20858	27697	1509	0.3279	0.3551	0.0179
36104124	1	1.8	20858	27848	1518	0.3351		
36104139	1	1.8	17551	24043	1313	0.3699		
36104140	1	1.8	17551	23772	1298	0.3545		
36104141	1	1.8	17551	23741	1296	0.3527		
36104142	1	1.8	17551	23679	1293	0.3492		
36104143	1	1.8	17551	23466	1281	0.3370		
36104152	1	1.8	16099	21788	1192	0.3534		
36104153	1	1.8	16099	22078	1208	0.3714		
36104154	1	1.8	16099	22006	1204	0.3669		
36104155	1	1.8	16099	22340	1222	0.3877		
36104138	5	3.4	19348	24640	1345	0.2735	0.2710	0.0075
36104137	5	3.4	19348	24334	1329	0.2577		
36104156	5	3.4	16280	20840	1142	0.2801		
36104157	5	3.4	16280	20705	1135	0.2718		
36104158	5	3.4	16280	20663	1132	0.2692		
36104159	5	3.4	16280	20739	1136	0.2739		
36104134	10	7.7	38643	47580	2579	0.2313	0.2169	0.0073
36104136	10	7.7	38643	47251	2561	0.2228		
36104144	10	7.7	35448	43289	2346	0.2212		
36104145	10	7.7	35448	43059	2334	0.2147		
36104146	10	7.7	32516	39656	2153	0.2196		
36104147	10	7.7	32516	39355	2137	0.2103		
36104148	10	7.7	32516	39492	2144	0.2145		
36104149	10	7.7	32516	39585	2149	0.2174		
36104150	10	7.7	32516	39193	2128	0.2053		
36104151	10	7.7	32516	39401	2139	0.2117		
36104133	15	12	32409	34537	1879	0.0657	0.0629	0.0119
36104132	15	12	32409	34416	1872	0.0619		
36104183	15	12	17711	18481	1015	0.0435		
36104185	15	12	16246	17464	961	0.0750		
36104186	15	12	16246	17357	955	0.0684		
36104329	15	12	37501	40833	2217	0.0889		
36104330	15	12	37501	41055	2229	0.0948		
36104331	15	12	37501	41005	2227	0.0934		
36104332	15	12	37501	40843	2218	0.0891		
36103982	mujer	17	6626	6946	395	0.0482		
36104044	mujer	17	418	451	41	0.0784		
36104046	mujer	17	418	407	257	-0.0263		
36104187	hombre	20	6124	6699	381	0.0939	0.0780	0.0148
36104188	hombre	20	6124	6630	377	0.0826		
36104189	hombre	20	6124	6664	379	0.0882		
36104190	hombre	20	6124	6487	369	0.0593		
36104191	hombre	20	6124	6527	371	0.0658		

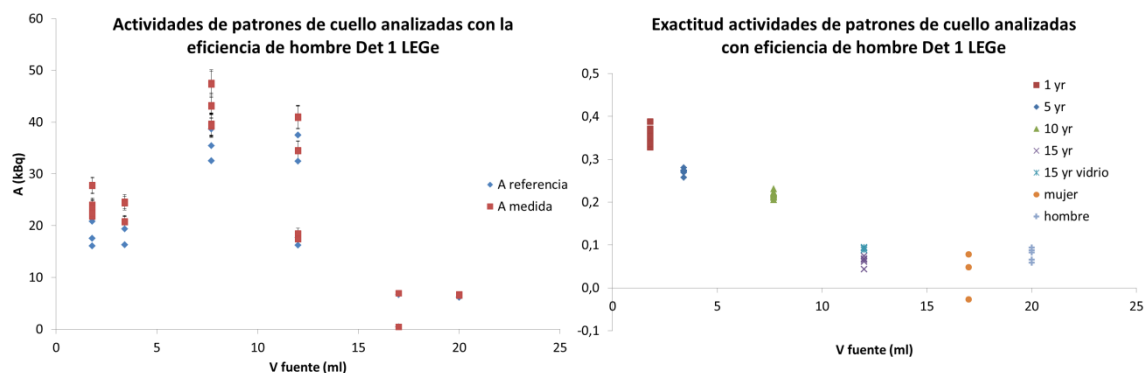


Figura 3.13: Comparativa de actividades y exactitudes de medidas realizadas a los patrones de cuello y analizadas con la eficiencia de hombre en el detector 1 del sistema LEGe.

3.5.2. Calibraciones del detector 1 del sistema LEGe

Las calibraciones de energía y de eficiencia del equipo se realizaron por separado. En la primera se utilizaron las fuentes radiactivas con geometría puntual que emitían en todo el rango de energía de detección del detector LEGe.

Las calibraciones en eficiencia se realizaron con los patrones simuladores de cuello, midiéndolos a una distancia determinada del detector. La eficiencia depende de la geometría y posicionamiento de la fuente, por lo tanto se obtuvieron eficiencias diferentes en cada caso.

3.5.2.1. Calibración en energía y FWHM del detector 1 del sistema LEGe

La calibración en energía consiste en relacionar la energía con los canales del espectro, con el objetivo de identificar en una medida los radionucleidos contaminantes. Se seleccionaron fuentes radiactivas cuyas emisiones gamma tenían fotopicos simples, bien definidos y que cubrían todo el rango de energético del detector LEGe (10-1000 keV). Los canales son 4094, por tanto cada canal cubre 0.25 keV.

La calibración de resolución del pico relaciona el ancho del pico a la mitad de la altura (FWHM), en unidades de keV, con la energía (keV). Este parámetro se emplea para la discriminación entre los picos con multipletes o picos muy próximos en la energía. La FWHM determina la resolución del equipo y aumenta a medida que aumenta la energía.

El software Abacos-Genie 2000 permite realizar de forma simultánea las calibraciones en energía y FWHM en los 4 detectores LE Ge, obteniendo 4 calibraciones individuales, 2

calibraciones por cada par de detectores (Det1-2 y Det3-4) y una calibración de la suma de la señal (All Summed) de todos los detectores.

En el sistema LEGe se realizó una medida de 300 s, con fuentes puntuales de ^{241}Am y de ^{152}Eu , cuyas emisiones están dentro del rango energético del sistema LEGe y se pueden ver en la Tabla 3.18. Se colocaron sobre un soporte de metacrilato a una distancia de 15 cm bajo el centro formado por los cuatro detectores, ver Figura 3.14. Se trata de una geometría fija, perfectamente reproducible que permite también la verificación del sistema de detección previamente a cada sesión de medidas.



Figura 3.14: Geometría de calibración de energía del sistema LEGe

Tabla 3.18: Período de desintegración, energía e intensidades de las emisiones X y γ del ^{241}Am y ^{152}Eu .

Radionucleido	Período de desintegración (a)	Energía (keV)	$I_E(\%)$
^{241}Am	433.16	13.90	13.2
		17.70	19.5
		20.90	4.8
		26.40	2.4
		59.54*	36.3
		40.10	37.7
		121.78*	28.4
^{152}Eu	13.61	244.69	7.5
		344.27*	26.5
		411.11	2.2
		443.98	3.1
		778.89	12.7
		867.32	4.2
		964.01	14.4

*Emisiones principales de los radionucleidos ^{152}Eu y ^{241}Am

La medida de calibración del detector LEGe con las fuentes puntuales de ^{241}Am y de ^{152}Eu , generó un espectro (ver Figura 3.15) cuyo eje x representa los canales y el eje y

representa el nº de cuentas por canal. El centroide de cada fotopico se relacionó con la energía correspondiente y conocida, de forma que se obtuvo una relación lineal canal-energía, como la que se ve en la Figura 3.16. La calibración en energía en medidas futuras se utilizará para identificar los picos desconocidos en un espectro, asociados a las emisiones de los diferentes radionucleidos contaminantes. A la vez que se iban relacionando los centroides con su energía, el software obtenía la anchura a mitad de altura de cada pico y lo relacionó con la energía. La FWHM es muy estrecha e indica que la resolución en este tipo de detectores es muy alta. En el caso concreto de medida de yodo en tiroides solo se utilizó el detector 1, por tanto, solo se tuvo en cuenta la calibración de dicho detector de forma individual.

La relación energía-canal obtenida en el detector 1 es lineal, viene dada por la ecuación 3.13 y la relación de FWHM con la energía es a través de la raíz cuadrada, con la ecuación 3.14.

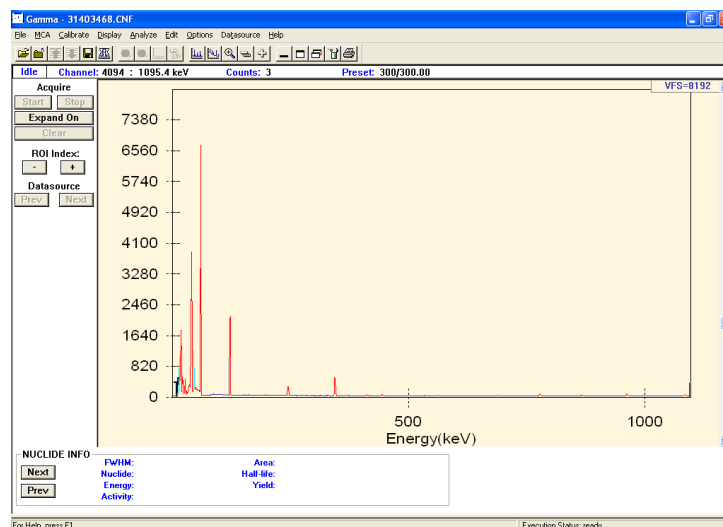


Figura 3.15: Espectro utilizado en la calibración en energía y FWHM, con fuentes de ^{241}Am y ^{152}Eu sistema LEGe.

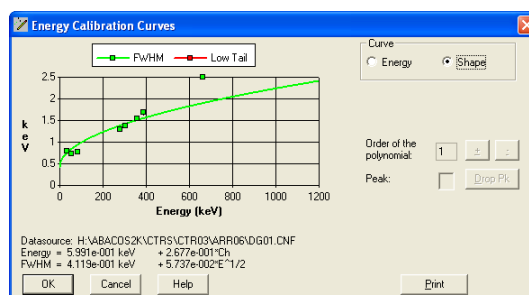
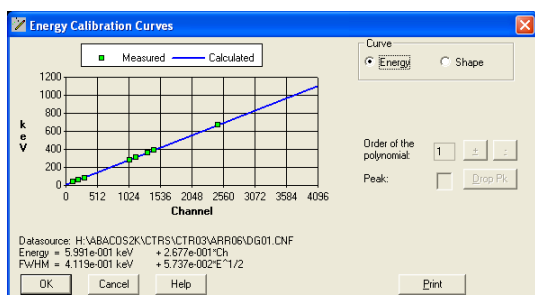


Figura 3.16: Calibración en energía y FWHM para el detector 1 del sistema LEGe en el rango de energías de 10-1000 keV.

$$\text{Calibración en energía: } E(\text{keV}) = 0.599 + 0.268 \cdot ch \quad (3.13)$$

$$\text{Calibración en FWHM: } FWHM = 0.412 + 0.057 \cdot E^{1/2} \quad (3.14)$$

3.5.2.2. Calibración en eficiencia de ^{131}I en tiroides del detector 1 del sistema LEGe

La determinación de la actividad de ^{131}I retenido en tiroides de personas con exposición interna requiere calibrar el detector en eficiencia en función de la energía. La familia de patrones de cuello utilizados para calibrar en eficiencias se han explicado en los apartados 3.3.3 y 3.3.4, y están basados en las especificaciones de la norma ANSI N44.3[86], en la publicación ICRU 48[87] y en las recomendaciones de ICRP 89[56].

La técnica de medida de cuello-tiroides de hombre adulto lleva puesta en marcha en el laboratorio del CRC del CIEMAT durante varios años, para trabajadores expuestos. La última calibración se realizó con una mezcla de ^{133}Ba (90 %) y ^{137}Cs (10 %), simuladora de las emisiones del ^{131}I . Sus principales emisiones energéticas e intensidades de emisión (ver Tabla 3.19) son muy parecidas a las del ^{131}I . La principal ventaja que tiene medir con este cóctel es que el periodo de semidesintegración del ^{133}Ba es de aproximadamente 10 años y del ^{137}Cs es de ~30 años lo que permite que antes de calibrar no pase ningún periodo de semidesintegración y no aumente así la incertidumbre de actividad de la fuente.

Tabla 3.19: Comparación de las principales energías e intensidades de emisión de ^{131}I , con las del ^{133}Ba y ^{137}Cs . <http://nucleardata.nuclear.lu.se>

^{131}I (8.02 d)	Simulador de yodo				
	^{133}Ba (10.5 a)		^{137}Cs (30 a)		
E γ (keV)	I γ (%)	E γ (keV)	I γ (%)	E γ (keV)	I γ (%)
80.185	2.62	53.161 1	2.199	31.817	2.04
284.305	6.14	79.6139 26	2.62	32.194	3.76
364.489	81.7	80.9971 14	34.06	661.657	85.1
636.989	7.17	276.398 2	7.164		
722.911	1.773	302.853 1	18.33		
		356.017 2	62.05		
		383.851 3	8.94		

El patrón de cuello se colocó en el interior de la cámara blindada, sobre una silla de dentista en geometría de cubito supino, bajo el detector 1 del sistema LEGe, centrado y paralelo bajo él, a una distancia 15 cm (ver Figura 3.17), reproducible en personas.

Para la calibración en eficiencia generé un certificado de fuentes con el formato adecuado, *.CTF, a través del software Abacos-Genie 2000, indicando la información del radionucleido, emisiones energéticas, intensidad y actividad [Bq] en la fecha de la medida calculada mediante la ecuación 2.4 del decaimiento radiactivo, en base a los certificados

de calibración de la fuente emitidos por el fabricante. Cada certificado de calibración del software los registré con los nombres que se muestran en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20: Certificado de fuentes utilizadas en las calibraciones del sistema LEGe.

Edad (años)	Certificado de calibración (*.CTF)
Hombre	Ba-Cs-Tiroides2013_lege
Mujer	l131_tiroid_mujerSTD_frc2014_00382
15	l131_tiroid_niño15y_frc2015_00420
10	l131_tiroid_niño10y_frc2015_00419
5	l131_tiroid_niño5y_frc2015_00418
1	l131_tiroid_niño1y_frc2015_00417

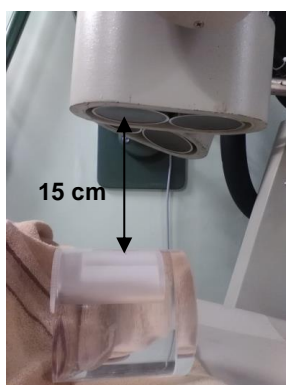


Figura 3.17: Geometría y posicionamiento del patrón de cuello de hombre para la calibración de ^{131}I en tiroides del detector 1 LEGe.

Se obtuvo la medida del patrón de tiroides del hombre adulto con el vial de ^{133}Ba y ^{137}Cs , con la geometría descrita, generándose un espectro como el de la Figura 3.18, que se utilizó para la calibración, donde se identifican varias emisiones, entre las que se destacan los picos de 30 keV, 80 keV y 356 keV procedentes del ^{133}Ba , y otra emisión en 662 keV procedente del ^{137}Cs . En cada pico espectral se seleccionó una ROI delimitando sus límites y contabilizando el área en su interior (n° cuentas), que es proporcional a la actividad del radionucleido.

En cada fotopico se calculó el factor de calibración con la ecuación 2.1 a partir del número cuentas del pico delimitadas por la Región de Interés (ROI), el tiempo de medida y la actividad de la fuente. La eficiencia de calibración es la normalización del factor de calibración de cada energía, es decir, dividiéndolo entre la intensidad de emisión del fotopico[79], ver ecuación 2.2. Su incertidumbre se calculó con la ecuación 2.3. La eficiencia se representó gráficamente (Figura 3.19) frente a la energía correspondiente, fue generada a partir del área cada fotopico, obteniendo diferentes puntos, dependiendo de la energía, que se ajustaron a una curva logarítmica (ecuación 3.15). Esta calibración permite interpolar la eficiencia para cualquier energía del rango calibrado, con el fin de

cuantificar la actividad de los radionucleidos con emisiones iguales o diferentes a los de calibración, medidos con la misma geometría de contaje.

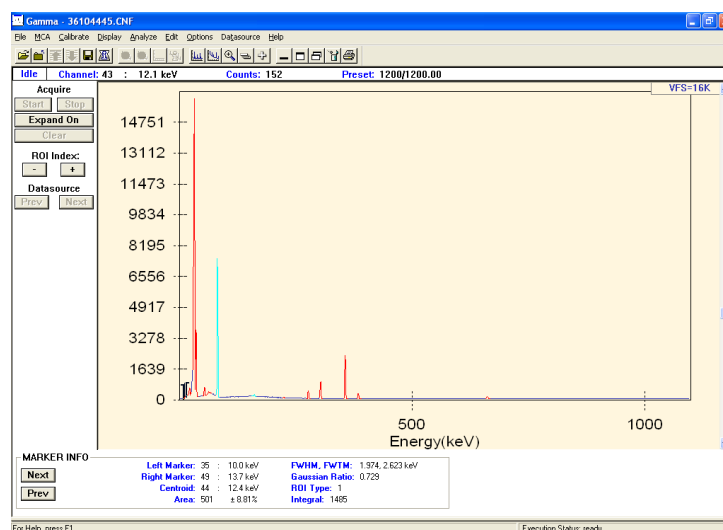


Figura 3.18: Espectro de calibración del det 1 LEGe con ^{133}Ba y ^{137}Cs en tiroides para hombre adulto

Calibración en eficiencia de hombre adulto

$$\ln(Eff) = 97.97 - 114.9 \cdot \ln(E) + 50.07 \cdot \ln(E)^2 - 10.69 \cdot \ln(E)^3 + 1.123 \cdot \ln(E)^4 - 0.04674 \cdot \ln(E)^5 \quad (3.15)$$

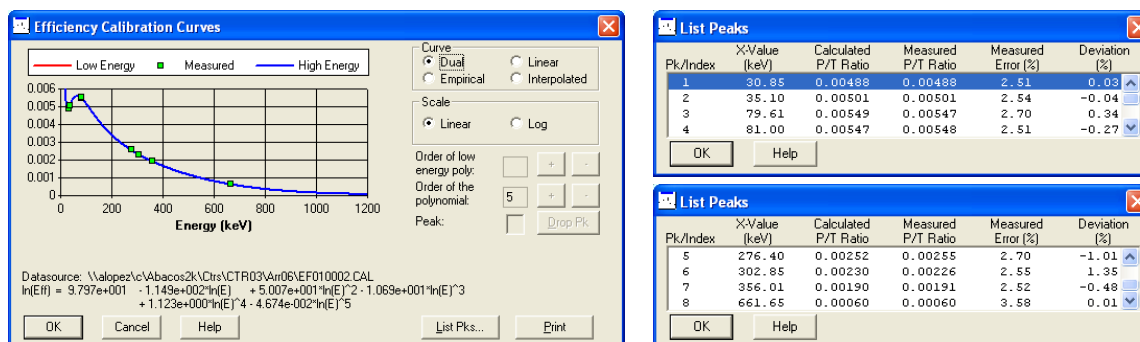


Figura 3.19: Curva de calibración en eficiencia y picos utilizados para el tiroides de hombre en el detector 1 LEGe.

Las calibraciones en eficiencia[80] para medida en tiroides de población expuesta de edades 1, 5, 10 y 15 años se realizaron con los patrones simuladores de cuellos presentados en los apartados 3.3.3 y 3.3.4, ver Figura 3.10; los viales simuladores de tiroides contienen ^{131}I (Tabla 3.15). La geometría de medida era igual que la de hombre adulto (Figura 3.17) el detector se situó paralelo al cuello y centrado en el vial, con una separación de 15 cm. El tiempo de medida fue de 1200 s. Los espectros de calibración de ^{131}I son como los de la Figura 3.20. Están formados por 6 fotopicos con forma gaussiana, muy bien definidos, con una FWHM muy estrecha. El pico más alto es el principal y característico del ^{131}I , de 364 keV, a su derecha se localizan los picos de 636 keV y de

722 keV, a la izquierda del pico principal se encuentran las emisiones de 284 keV, de 80 keV y el primer pico de emisión de rayos X con energía de 30 keV.

Los espectros que utilicé para la calibración en cada geometría fueron 36104139.CNF, 36104138.CNF, 36104136.CNF, 36104133.CNF, 36103982.CNF para las configuraciones de 1 año, 5, 10 y 15 años y mujer, respectivamente.

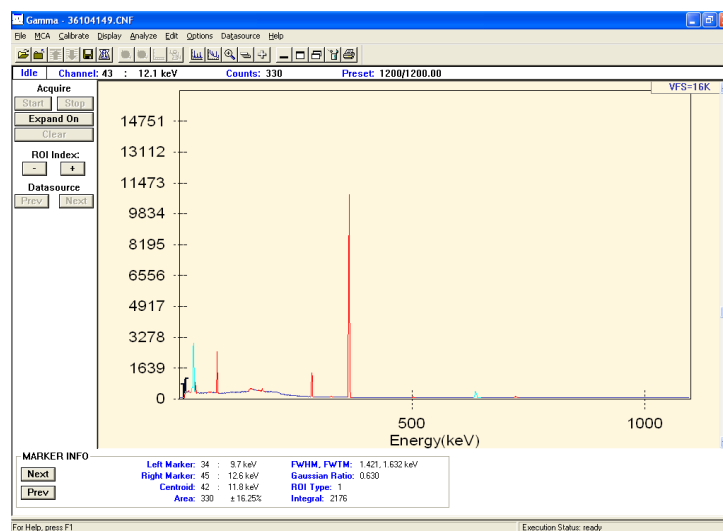


Figura 3.20: Espectro de calibración de ^{131}I en tiroides para hombre con geometría de cubito supino.

El procedimiento de calibración en eficiencia se explica en el apartado 2.4.3. Las emisiones que se tuvieron en cuenta en la calibración de ^{131}I fueron: 80 keV, 284 keV, 364 keV, 636 keV y 722 keV. Se obtuvieron los factores de calibración [cps/Bq] en cada pico y se normalizaron obteniendo las eficiencias [c/γ]. Representando gráficamente las eficiencias frente a las energías resulta una serie de puntos que se ajustaron a una curva logarítmica en todo el rango energético de detección. Como en el caso de hombre adulto, estas curvas permiten interpolar la eficiencia para cualquier energía dentro del rango de detección. Las curvas de calibración de la eficiencia resultante para 1, 5, 10, 15 años y de mujer adulta con el detector 1 del sistema LEGe están dadas por las ecuaciones 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20, respectivamente, y se pueden visualizar en la Figura 3.21.

Calibración en eficiencia de 1 año

$$\ln(\text{Eff}) = -8.98 + 2.221 \cdot \ln(E) - 0.2903 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.16)$$

Calibración en eficiencia de 5 años

$$\ln(\text{Eff}) = -8.901 + 2.142 \cdot \ln(E) - 0.2806 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.17)$$

Calibración en eficiencia de 10 años

$$\ln(\text{Eff}) = -8.47 + 1.936 \cdot \ln(E) - 0.2593 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.18)$$

Calibración en eficiencia de 15 años

$$\ln(Eff) = -8.776 + 1.979 \cdot \ln(E) - 0.2622 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.19)$$

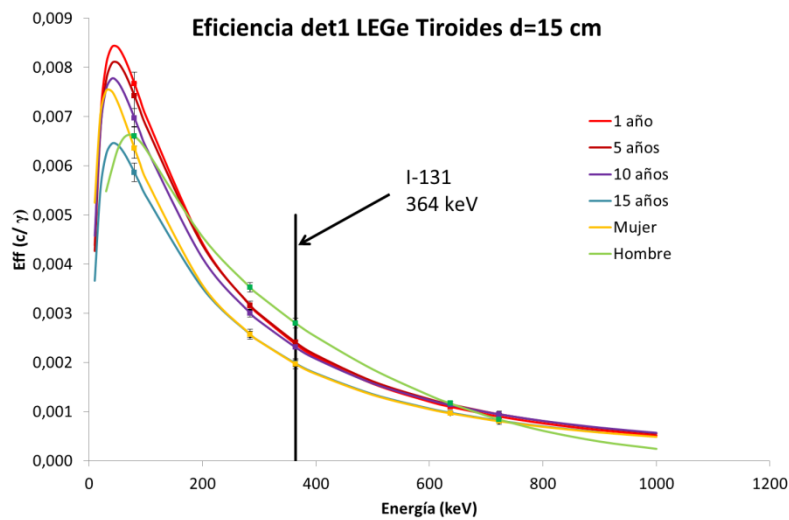
Calibración en eficiencia de mujer

$$\ln(Eff) = -7.890 + 1.701 \cdot \ln(E) - 0.2407 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.20)$$

Edad (años)	Curva de eficiencia	Picos considerados																														
1		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pk/Index</th> <th>X-Value (keV)</th> <th>Calculated P/T Ratio</th> <th>Measured P/T Ratio</th> <th>Measured Error (%)</th> <th>Deviation (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>80.18</td><td>0.00803</td><td>0.00801</td><td>2.95</td><td>0.32</td></tr> <tr><td>2</td><td>284.30</td><td>0.00335</td><td>0.00343</td><td>2.64</td><td>-2.54</td></tr> <tr><td>3</td><td>364.48</td><td>0.00253</td><td>0.00250</td><td>2.06</td><td>1.22</td></tr> <tr><td>4</td><td>636.97</td><td>0.00118</td><td>0.00112</td><td>3.13</td><td>5.33</td></tr> </tbody> </table>	Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)	1	80.18	0.00803	0.00801	2.95	0.32	2	284.30	0.00335	0.00343	2.64	-2.54	3	364.48	0.00253	0.00250	2.06	1.22	4	636.97	0.00118	0.00112	3.13	5.33
Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)																											
1	80.18	0.00803	0.00801	2.95	0.32																											
2	284.30	0.00335	0.00343	2.64	-2.54																											
3	364.48	0.00253	0.00250	2.06	1.22																											
4	636.97	0.00118	0.00112	3.13	5.33																											
5		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pk/Index</th> <th>X-Value (keV)</th> <th>Calculated P/T Ratio</th> <th>Measured P/T Ratio</th> <th>Measured Error (%)</th> <th>Deviation (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>80.18</td><td>0.00740</td><td>0.00725</td><td>2.63</td><td>-0.37</td></tr> <tr><td>2</td><td>284.30</td><td>0.00315</td><td>0.00325</td><td>2.63</td><td>-2.82</td></tr> <tr><td>3</td><td>364.48</td><td>0.00240</td><td>0.00237</td><td>2.06</td><td>1.10</td></tr> <tr><td>4</td><td>636.97</td><td>0.00115</td><td>0.00106</td><td>3.11</td><td>8.46</td></tr> </tbody> </table>	Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)	1	80.18	0.00740	0.00725	2.63	-0.37	2	284.30	0.00315	0.00325	2.63	-2.82	3	364.48	0.00240	0.00237	2.06	1.10	4	636.97	0.00115	0.00106	3.11	8.46
Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)																											
1	80.18	0.00740	0.00725	2.63	-0.37																											
2	284.30	0.00315	0.00325	2.63	-2.82																											
3	364.48	0.00240	0.00237	2.06	1.10																											
4	636.97	0.00115	0.00106	3.11	8.46																											
10		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pk/Index</th> <th>X-Value (keV)</th> <th>Calculated P/T Ratio</th> <th>Measured P/T Ratio</th> <th>Measured Error (%)</th> <th>Deviation (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>80.18</td><td>0.00697</td><td>0.00694</td><td>2.68</td><td>0.47</td></tr> <tr><td>2</td><td>284.30</td><td>0.00300</td><td>0.00311</td><td>2.45</td><td>-3.46</td></tr> <tr><td>3</td><td>364.48</td><td>0.00231</td><td>0.00227</td><td>2.03</td><td>1.57</td></tr> <tr><td>4</td><td>636.97</td><td>0.00114</td><td>0.00105</td><td>2.62</td><td>8.16</td></tr> </tbody> </table>	Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)	1	80.18	0.00697	0.00694	2.68	0.47	2	284.30	0.00300	0.00311	2.45	-3.46	3	364.48	0.00231	0.00227	2.03	1.57	4	636.97	0.00114	0.00105	2.62	8.16
Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)																											
1	80.18	0.00697	0.00694	2.68	0.47																											
2	284.30	0.00300	0.00311	2.45	-3.46																											
3	364.48	0.00231	0.00227	2.03	1.57																											
4	636.97	0.00114	0.00105	2.62	8.16																											
15		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pk/Index</th> <th>X-Value (keV)</th> <th>Calculated P/T Ratio</th> <th>Measured P/T Ratio</th> <th>Measured Error (%)</th> <th>Deviation (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>80.18</td><td>0.00587</td><td>0.00583</td><td>3.24</td><td>0.62</td></tr> <tr><td>2</td><td>284.30</td><td>0.00257</td><td>0.00264</td><td>2.54</td><td>-2.57</td></tr> <tr><td>3</td><td>364.48</td><td>0.00196</td><td>0.00197</td><td>2.04</td><td>0.40</td></tr> <tr><td>4</td><td>636.97</td><td>0.00098</td><td>0.00087</td><td>2.85</td><td>12.42</td></tr> </tbody> </table>	Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)	1	80.18	0.00587	0.00583	3.24	0.62	2	284.30	0.00257	0.00264	2.54	-2.57	3	364.48	0.00196	0.00197	2.04	0.40	4	636.97	0.00098	0.00087	2.85	12.42
Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)																											
1	80.18	0.00587	0.00583	3.24	0.62																											
2	284.30	0.00257	0.00264	2.54	-2.57																											
3	364.48	0.00196	0.00197	2.04	0.40																											
4	636.97	0.00098	0.00087	2.85	12.42																											
Mujer		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pk/Index</th> <th>X-Value (keV)</th> <th>Calculated P/T Ratio</th> <th>Measured P/T Ratio</th> <th>Measured Error (%)</th> <th>Deviation (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>80.18</td><td>0.00554</td><td>0.00553</td><td>3.23</td><td>0.22</td></tr> <tr><td>2</td><td>284.30</td><td>0.00257</td><td>0.00262</td><td>4.41</td><td>-2.11</td></tr> <tr><td>3</td><td>364.48</td><td>0.00196</td><td>0.00194</td><td>2.95</td><td>1.15</td></tr> <tr><td>4</td><td>636.97</td><td>0.00096</td><td>0.00097</td><td>5.26</td><td>-0.82</td></tr> </tbody> </table>	Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)	1	80.18	0.00554	0.00553	3.23	0.22	2	284.30	0.00257	0.00262	4.41	-2.11	3	364.48	0.00196	0.00194	2.95	1.15	4	636.97	0.00096	0.00097	5.26	-0.82
Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)																											
1	80.18	0.00554	0.00553	3.23	0.22																											
2	284.30	0.00257	0.00262	4.41	-2.11																											
3	364.48	0.00196	0.00194	2.95	1.15																											
4	636.97	0.00096	0.00097	5.26	-0.82																											

Figura 3.21: Curvas de eficiencia de ^{131}I en tiroides para las diferentes configuraciones en el detector 1 LGE.

Se representan las eficiencias en función de la energía, de todas las configuraciones con el fin de compararlas en la Figura 3.22. Sus tendencias son similares, crecientes para las energías muy bajas, obteniendo un máximo para energías de aproximadamente 50 keV, a partir de esta energía decrecen. Las geometrías de niños de 1 año, 5 años, 10 años y 15 años tienen eficiencias muy parecidas en todo el rango energético excepto para energías entre 50-300 keV que es donde más difieren. Las eficiencias menores, en ese rango, son para las configuraciones de 15 años y hombre adulto y la mayor para la configuración de 1 año.

Figura 3.22: Comparativa de las curvas de calibración en eficiencias de ^{131}I en el rango energético del detector 1 del sistema LGE.

En la Figura 3.23 y Tabla 3.21 se muestran las eficiencias de ^{131}I en tiroides en su emisión energética principal (364 keV) en función del volumen.

Por tanto, se puede concluir que en el detector 1 del sistema LGE las eficiencias son muy parecidas para los casos de 1, 5 y 10 años, y ligeramente menores para las configuraciones de 15 años y adultos que son semejantes.

Tabla 3.21: Eficiencia de ^{131}I en tiroides en la emisión de 364 keV para los diferentes volúmenes de tiroides.

V (ml)	Eff (c/γ)
1.80	0.002375
3.4	0.002411
7.7	0.002310
12	0.001981
17	0.001970

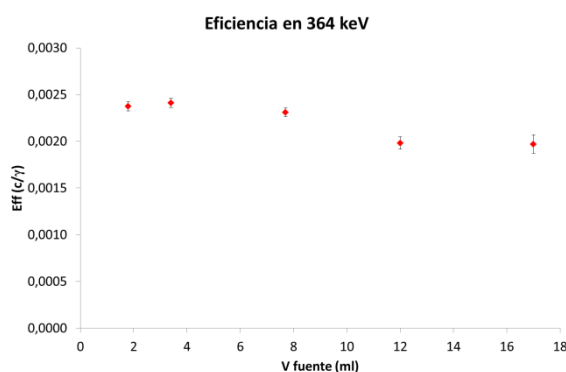


Figura 3.23: Evolución de la eficiencia en la emisión de 364 keV en función del volumen del tiroides

La curva de calibración en eficiencia depende principalmente del tamaño de la fuente, la eficiencia es mayor para la fuente con menor volumen, otros parámetros que también influyen en la calibración son la distancia patrón de cuello- detector y el posicionamiento detector-patrón.

Estas calibraciones con detector LEGe son muy adecuadas para utilizarlas en caso de contaminaciones en las que hay varios radioisótopos de yodo, como ^{132}I o ^{133}I que tienen periodos de semidesintegración menores que el ^{131}I , que se incorporan en el organismo y permanecen retenidos en el tiroides, y que solo se pueden medir poco después de la incorporación. Además, hay otros radioyodos, más utilizados en medicina nuclear, como ^{123}I y ^{125}I , este último tiene emisiones energéticas más bajas, de rayos X y radiación gamma, en torno a 30 keV que el detector de germanio es capaz de detectar y discernir.

3.5.2.3. Validación de la calibración en eficiencia de ^{131}I en tiroides en el detector 1 LEGe

Realicé nuevas medidas con las mismas fuentes de calibración, y se analizaron con su respectiva eficiencia recién obtenida, obteniendo las actividades que se muestran en la Tabla 3.22. La exactitud (Br_i) es menor de 0.03 en todas las configuraciones. Se representaron gráficamente los valores de la actividad de referencia y la actividad medida con respecto al volumen de los viales, también se compara la exactitud de las actividades obtenidas con su propia eficiencia dependiendo de la edad, con las estimadas con la eficiencia del hombre adulto (ambas gráficas en Figura 3.24). Se observa que la exactitud mejoró para todos los casos. Estos resultados son indicadores claros de la importancia de disponer de patrones y curvas de calibración en eficiencias propias de la edad del individuo que se va a medir.

Tabla 3.22: Resultados de actividad de ^{131}I para las diferentes configuraciones, obtenidos con cada eficiencia dependiendo de la edad

Espectro	Edad (años)	Volumen (ml)	A(Bq) Referencia	A (Bq) medida	ΔA (Bq) Medida	Bri	Br	SBr
36104123	1	1.8	20858	20237	1509	-0.0298	-0.0103	0.0122
36104139	1	1.8	17551	17568	1518	0.0010		
36104140	1	1.8	17551	17370	1313	-0.0103		
36104141	1	1.8	17551	17348	1298	-0.0116		
36104142	1	1.8	17551	17302	1296	-0.0142		
36104143	1	1.8	17551	17147	1293	-0.0230		
36104152	1	1.8	16099	15921	1281	-0.0111		
36104153	1	1.8	16099	16133	1192	0.0021		
36104154	1	1.8	16099	16080	1208	-0.0012		
36104155	1	1.8	16099	16246	1204	0.0091		
36104138	5	3.4	19348	18960	1222	-0.0201	-0.0220	0.0057
36104137	5	3.4	19348	18724	1345	-0.0323		
36104156	5	3.4	16280	16036	1329	-0.0150		
36104157	5	3.4	16280	15932	1142	-0.0214		
36104158	5	3.4	16280	15900	1135	-0.0233		
36104159	5	3.4	16280	15958	1132	-0.0198		
36104134	10	7.7	38643	38056	1136	-0.0152	-0.0267	0.0058
36104136	10	7.7	38643	37793	2579	-0.0220		
36104144	10	7.7	35448	34624	2561	-0.0232		
36104145	10	7.7	35448	34441	2346	-0.0284		
36104146	10	7.7	32516	31719	2334	-0.0245		
36104147	10	7.7	32516	31478	2153	-0.0319		
36104148	10	7.7	32516	31587	2137	-0.0286		
36104149	10	7.7	32516	31662	2144	-0.0263		
36104148	10	7.7	32516	31348	2149	-0.0359		
36104148	10	7.7	32516	31515	2128	-0.0308		
36104133	15	12	32409	32182	2139	-0.0070	-0.0096	0.0110
36104132	15	12	32409	32069	1879	-0.0105		
36104183	15	12	17711	17221	1872	-0.0277		
36104185	15	12	16246	16273	1015	0.0017		
36104186	15	12	16246	16173	961	-0.0045		
36103982	mujer	17	6626	6536	955	-0.0136	-0.0011	0.0145
36104044	mujer	17	418	424	2226	0.0148		
36104046	mujer	17	418	416	2217	-0.0044		

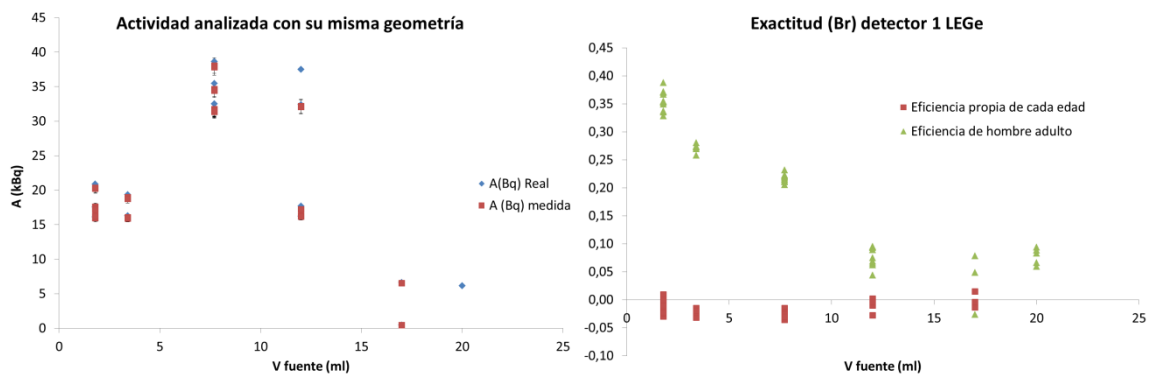


Figura 3.24: Comparación de las actividades medidas y de referencia, y exactitud para las medidas realizadas de las diferentes configuraciones con el detector 1 LEGe.

La validación final de las calibraciones se realizó con viales distintos de los de calibración, conteniendo ^{133}Ba y ^{137}Cs (simuladores de las emisiones del ^{131}I), cuyas actividades se muestran en la Tabla 3.16. Las medidas se hicieron con la misma geometría que la de calibración obteniendo espectros que se analizaron con la eficiencia de calibración correspondiente a su edad.

Los resultados de las actividades medidas se muestran en la Tabla 3.23, y se representan en la Figura 3.25, donde se observa que la exactitud (Br) es menor del 10 % en la emisión principal del ^{133}Ba , 356 keV, equivalente a la emisión principal de ^{131}I , 364 keV; para el caso del ^{137}Cs en 661 keV se obtienen exactitudes peores, pero en todos los casos por debajo del 0.21. La precisión (SBr) es inferior al 0.04. En todos los casos se cumplen los criterios de aceptación asociados a los parámetros de estudio de la norma ISO 28218[59] con el rango de exactitud de [-0.25, +0.50] y de precisión (SBr) menor de 0.4.

Tabla 3.23: Resultados de las actividades de los simuladores de ^{133}Ba y ^{137}Cs obtenidos con cada eficiencia dependiendo de la edad.

Espectro	Edad (a)	^{133}Ba					^{137}Cs							
		Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (Bq)	Bri	Br	SBr	Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (Bq)	Bri	Br	SBr	
36104429	1	9488.0	9032	314	-0.05				944.9	1075	85	0.14		
36104432	1	9452.0	8935	312	-0.05				943.7	1084	86	0.15		
36104433	1	9452.0	8992	313	-0.05	-0.0461	0.0068		943.7	1115	88	0.18	0.1492	0.0266
36104434	1	9452.0	9059	315	-0.04				943.7	1050	84	0.11		
36104435	1	9452.0	9101	317	-0.04				943.7	1100	87	0.17		
36104427	5	9484.3	8967	314	-0.05				943.9	1080	86	0.14		
36104437	5	9450.8	8743	307	-0.07				943.7	1036	82	0.10		
36104438	5	9450.8	8908	312	-0.06	-0.0600	0.0075		943.7	1058	84	0.12	0.1209	0.0283
36104439	5	9450.8	8887	311	-0.06				943.7	1033	82	0.09		
36104440	5	9450.8	8925	312	-0.06				943.7	1099	86	0.16		
36104441	5	9450.8	8909	312	-0.06				943.7	1042	84	0.10		
36104426	10	9524.3	8790	300	-0.08				947.9	1021	76	0.08		
36104444	10	9486.6	8616	294	-0.09				946.6	980	74	0.04		
36104445	10	9486.6	8589	294	-0.09	-0.0884	0.0068		946.6	984	75	0.04	0.0456	0.0165
36104446	10	9486.6	8683	296	-0.08				946.6	995	74	0.05		
36104447	10	9486.6	8589	294	-0.09				946.6	984	75	0.04		
36104448	10	9486.6	8657	295	-0.09				946.6	976	74	0.03		
36104425	15	9561.3	9133	323	-0.04				950.9	1044	86	0.10		
36104449	15	9523.5	9131	320	-0.04	-0.0453	0.0043		949.6	1116	87	0.17	0.1335	0.0387
36104450	15	9523.5	9049	318	-0.05				949.6	1071	85	0.13		
36104428	M	9519.3	9685	489	0.02				946.9	1136	144	0.20		
36104451	M	9481.6	9637	487	0.02	0.0042	0.0219		945.6	1103	140	0.17	0.1911	0.0215
36104452	M	9481.6	9282	470	-0.02				945.6	1142	145	0.21		

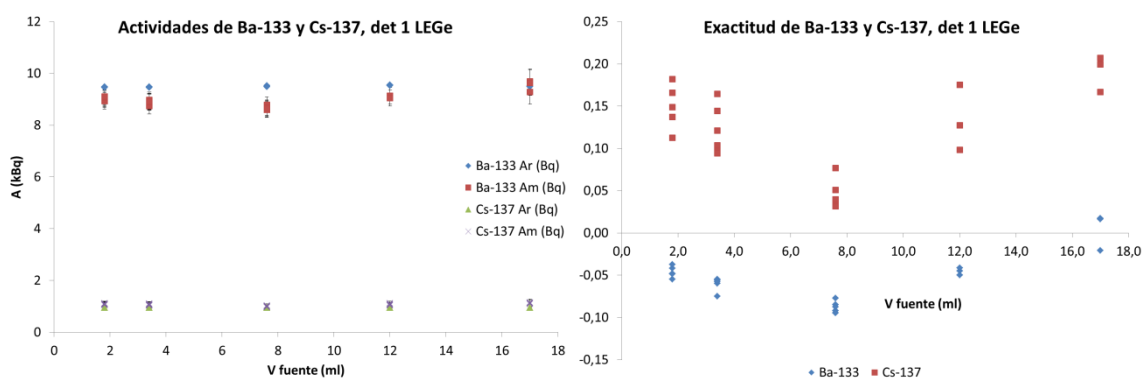


Figura 3.25: Actividades medidas y de referencia de los viales y exactitud para los patrones de cuello de ^{133}Ba y ^{137}Cs medidos en el detector 1 del sistema LEGe

3.5.3. Estudio previo de medidas con el contador Fastscan

El detector superior del contador Fastscan estaba calibrado en eficiencia de tiroides de hombre adulto. Las medidas de los patrones descritos en los apartados 3.3.3 y 3.3.4 se analizaron con la eficiencia de adulto para valorar las diferencias de la actividad medida respecto a la actividad de referencia, y para ver si es necesario hacer nuevas calibraciones dependiendo de la edad del individuo expuesto.

3.5.3.1. Actividades de maniqués de cuello-tiroides de distintas edades medidas con el contador Fastscan y analizadas con la eficiencia de tiroides de hombre adulto

En la geometría de calibración de tiroides de hombre adulto, la posición del cuello está a una altura del tiroides desde el suelo de 157 cm y a una distancia al detector de 12 cm, para medirlo con el detector NaI (TI) superior del contador Fastscan. Los patrones de los cuellos se colocaron sobre un soporte de metacrilato para poder estar a esa altura de referencia. Se midieron dichos maniqués de tiroides escalados por edad, obteniéndose espectros que se analizaron con la calibración en energía y FWHM en vigor y con la calibración en eficiencia del hombre adulto, ambas realizadas previamente, y se obtuvieron las actividades medidas en cada caso, ver Tabla 3.24 y Figura 3.26.

En todos los casos, para todas las edades, la actividad analizada con la calibración de hombre adulto es mayor que la actividad de referencia. La desviación de la exactitud (B_r) se sobrevalora un 55 % para el caso de los niños de 1 año, 50 % para los niños de 5 años, 18 % en los niños de 10 años, y 10 % y 14 % para los de 15 años y mujer, respectivamente. Según estos resultados, **se considera conveniente calibrar en las configuraciones de cuello de 1, 5 y 10 años**, las desviaciones de 15 años y mujer son menores, pero es posible que calibrando con los patrones de cuello correspondientes se mejore el valor de la actividad medida.

Tabla 3.24: Medidas de los patrones en el detector superior del contador Fastscan analizado con la eficiencia de hombre adulto.

Edad (años)	Espectro	V (ml) fuente	A (Bq) Referencia	A (Bq) Medida	ΔA (Bq) medida	Bri	Exactitud (Br)	Precisión (SBr)
1	92104530	1.8	16100	25031	1557	0.5547	0.5493	0.0048
	92104531		16100	25028	1559	0.5545		
	92104532		16100	24883	1550	0.5455		
	92104533		16100	24861	1546	0.5442		
	92104534		16100	24883	1548	0.5455		
	92104535		16100	24974	1553	0.5512		
5	92104523	3.4	17748	26353	1642	0.4848	0.4955	0.0149
	92104524		17748	26331	1640	0.4836		
	92104525		17748	26439	1645	0.4897		
	92104526		17748	26434	1644	0.4894		
	92104527		17748	26439	1645	0.4897		
	92104528		16280	24822	1544	0.5247		
92104529	16280	24522	1525	0.5063				
10	92104520	7.7	38643	45402	2819	0.1749	0.1758	0.0027
	92104521		38643	45354	2816	0.1737		
	92104522		38643	45556	2829	0.1789		
15	92104514	12	32409	35748	2220	0.1030	0.1027	0.0022
	92104515		32409	35827	2225	0.1055		
	92104516		32409	35782	2222	0.1041		
	92104517		32409	35663	2215	0.1004		
	92104518		32409	35664	2215	0.1004		
Mujer	92104250	17	644	727	77	0.1289	0.1390	0.0235
	92104251		644	752	75	0.1677		
	92104252		644	726	76	0.1273		
	92104253		644	726	75	0.1273		
	92104254		644	753	74	0.1693		
	92104255		644	717	64	0.1134		

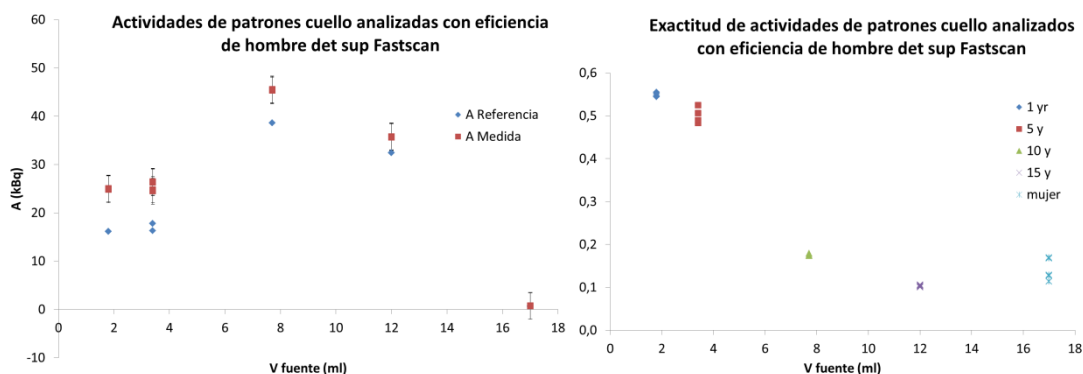


Figura 3.26: Actividades medidas, de referencia y exactitudes (Bri) de la familia de patrones de cuello en la geometría de medida en tiroides de hombre adulto y análisis con la eficiencia de hombre adulto.

3.5.4. Calibración del contador Fastscan

El contador Fastscan[52] se utiliza para medir radioyodo en tiroides con geometría de pie, ver Figura 3.27, a personas con riesgo de exposición interna de ^{131}I . Las calibraciones de los tiroides se hacen teniendo en cuenta la altura del tiroides de cada edad, por ello es

necesario que esté calibrado en energías y FWHM en los dos detectores (superior e inferior).



Figura 3.27: Esquema de la calibración de tiroides

3.5.4.1. Calibración en energía y FWHM en el contador Fastscan

La calibración en energía y FWHM se realizó con fuentes puntuales de ^{57}Co , ^{137}Cs y ^{60}Co , cuyas emisiones energéticas principales se muestran en la Tabla 3.25, y cubren el rango de detección (100-2000 keV) del equipo Fastscan.

Tabla 3.25: Vida media y emisiones del ^{57}Co , ^{137}Cs y ^{60}Co .

Radionucleido	$T_{1/2}$ (años)	E (keV)	Ie (%)
^{57}Co	0.744	122.06	85.60
^{137}Cs	30.13	661.65	85.00
^{60}Co	5.27	1173.24	99.90
		1332.50	99.98

A partir de una medida de las fuentes puntuales y con el espectro obtenido en cada uno de los detectores, semejante al de la Figura 3.28, calibré el detector superior y el inferior, según he explicado en el apartado 2.4.1. Seleccionando el centroide de cada fotopico del espectro y relacionándolo con su energía, se obtiene una relación energía-canal ajustada a una recta. Simultáneamente, el software va adquiriendo los datos de la FWHM de cada fotopico, obteniendo una relación de la anchura a mitad de altura en función de la energía del centroide. Las relaciones de las calibraciones en energía y FWHM se presentan en las ecuaciones 3.21 y 3.22 y en la Figura 3.29 para los detectores superior e inferior respectivamente del contador Fastscan. Gracias a la calibración en energía se puede identificar las energías de emisión, y por tanto los radionucleidos contaminantes en un espectro cuya medida ha sido realizada en el equipo Fastscan.

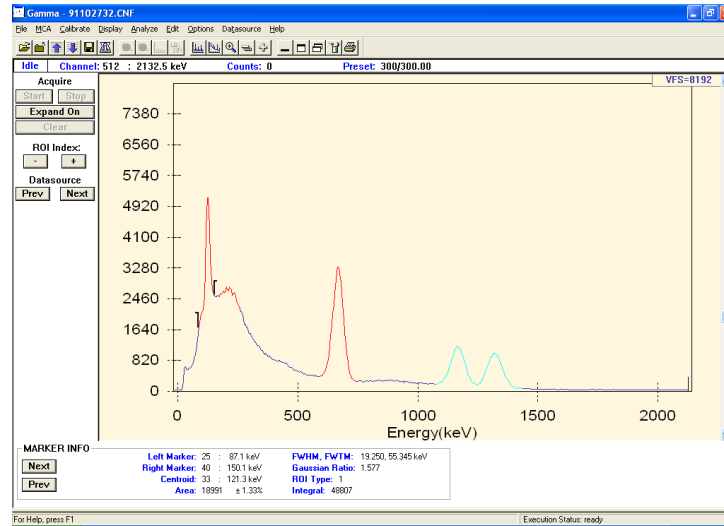


Figura 3.28: Espectro de calibración de E y FWHM del detector superior del Fastscan.

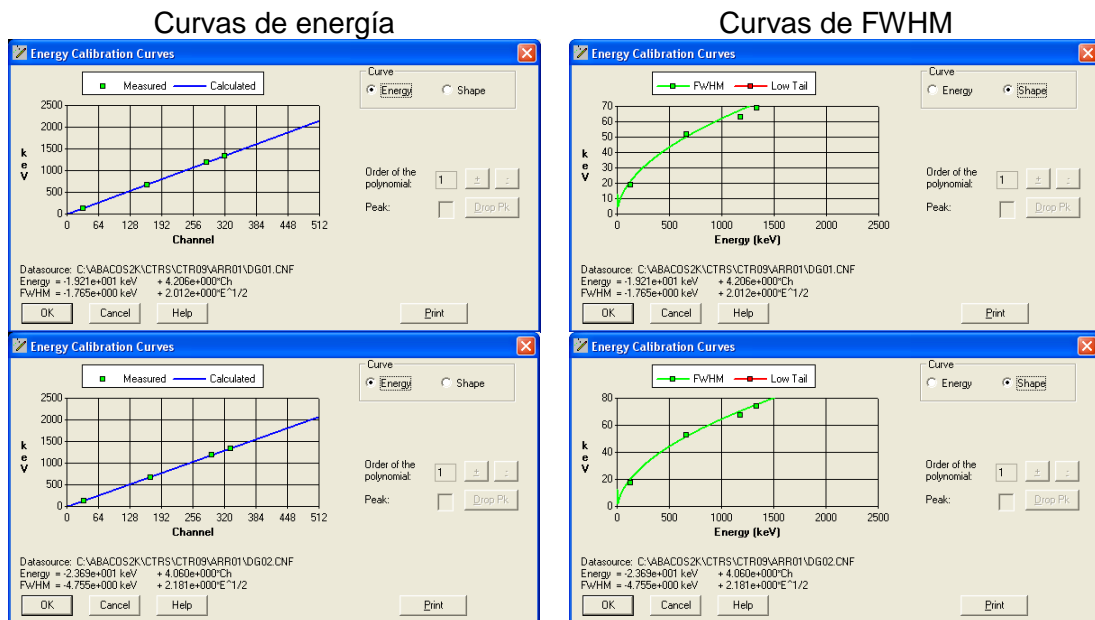


Figura 3.29: Curvas de calibración de Energía y FWHM de los detectores superior e inferior del Fastscan.

Curva Energía
Curva FWHM

$$\text{Detector superior} \quad E(\text{keV}) = -19.21 + 4.206 \cdot \text{ch} \quad \text{FWHM} = -1.765 + 2.012 \cdot E^{1/2} \quad (3.21)$$

$$\text{Detector inferior} \quad E(\text{keV}) = -23.69 + 4.060 \cdot \text{ch} \quad \text{FWHM} = -4.755 + 2.181 \cdot E^{1/2} \quad (3.22)$$

3.5.4.2. Calibración en eficiencia de ^{131}I en tiroides en el contador Fastscan

La calibración en eficiencia se realiza conforme al apartado 2.4.3. El detector superior estaba ya calibrado en eficiencia de ^{131}I en tiroides de hombre adulto, en la que se utilizó el patrón de cuello consistente en el maniquí de tiroides adulto BIODEX[74] con un vial de 20 ml relleno de ^{133}Ba y ^{137}Cs , simuladores de ^{131}I (ver apartados 3.3.3 y 3.3.4). El patrón de cuello de hombre fue colocado sobre un soporte de metacrilato que consiste en tres

barras verticales sobre las que se apoyan 4 placas. Cada placa estaba posicionada a diferente altura, resultando una estructura sobre la que se pueden colocar los maniqués en geometría de pie. Sobre la placa más alta se colocó el patrón de cuello en geometría de pie, con el simulador del tiroides frente al detector, a una distancia de 12 cm (ver Figura 3.30). En el caso del hombre, la altura del tiroides fue de 157 cm.

La medida para el cuello simulador de hombre fue de 300 s (5 min), en la posición descrita y el espectro obtenido es como el de la Figura 3.31, con una emisión principal en 356 keV, otros picos secundarios en 302 keV y 662 keV. Se observa que la resolución espectral de los detectores NaI(Tl) es peor, los picos son más anchos (FWHM es mayor), que en el espectro obtenido con el detector de LEGe (Figura 3.18). La ventaja principal de utilizar un detector NaI(Tl) es que es más eficiente que un detector LEGe y por tanto necesita menos tiempo de medida para obtener una buena respuesta de conteo.



Figura 3.30: Geometría de medida de Tiroides en Fastscan.

El factor de calibración de cada fotopico se calcula con la ecuación 2.1; dividiéndolo entre su intensidad de emisión se normaliza obteniendo la eficiencia en (cuentas /gamma). Representando gráficamente la eficiencia frente a la energía (Figura 3.32) el resultado es una serie de puntos que se pueden ajustar a una curva logarítmica (ecuación 3.23) en todo el rango energético.

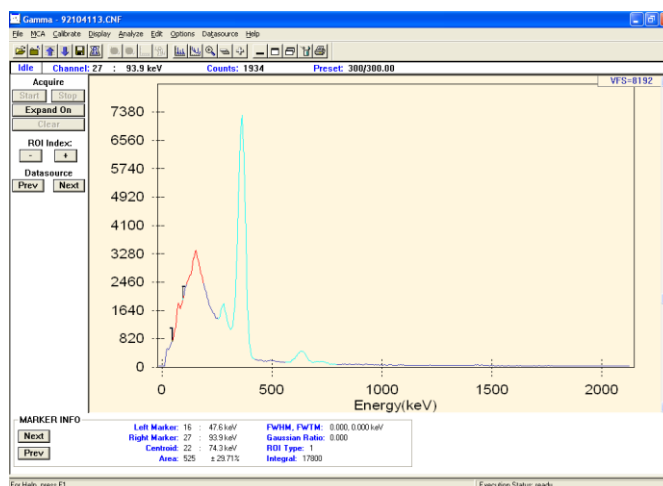


Figura 3.31: Espectro de ^{133}Ba y ^{137}Cs en un vial simulador de tiroides en el cuello de hombre medido en el contador Fastscan.

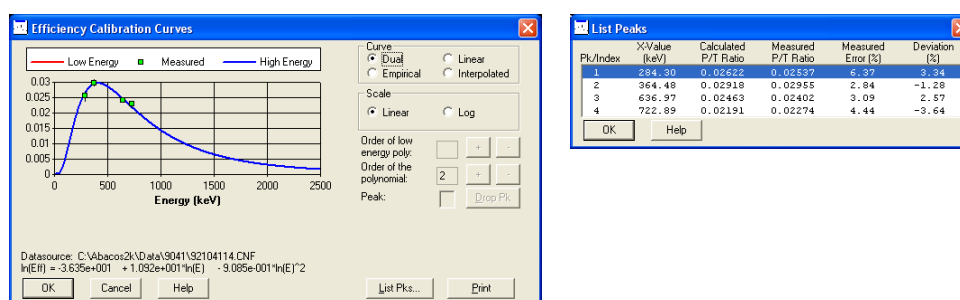


Figura 3.32: Curva de eficiencia y picos del espectro utilizados para la calibración geometría de ^{131}I en tiroides de hombre.

$$\ln(Eff) = -36.35 + 10.92 * \ln(E) - 0.9085 * \ln(E)^2 \quad (3.23)$$

- Elección de geometrías

La geometría de calibración en cada caso es diferente, ya que la altura y el tamaño del tiroides es diferente para cada persona, dependiendo de la edad y del sexo. Se calibró el contador Fastscan con los patrones de cuello de 1, 5, 10, 15 años y mujer adulta, a una distancia de 12 cm del detector. El patrón de cuello se colocó a una altura del tiroides, considerada como referencia, con ayuda del soporte de metacrilato. La altura del tiroides en cada caso (ver Tabla 3.26), se estimó a partir de los datos de altura para las edades consideradas publicados por la Organización Mundial de la Salud (WHO)[88], y teniendo en cuenta la altura de la cabeza para las diferentes edades. Me encontré con el problema de que no existen referencias de la medida de la altura de la cabeza para diferentes edades, y la norma ANSI 13.35[89] “Especificaciones para el Maniquí BOMAB”, especifica el tamaño de cada pieza para simular la figura humana en diferentes edades (4 años (12.2 cm), 10 años (16.3 cm), mujer (18 cm) y hombre(20 cm)), de aquí se estimó la altura de la cabeza en cada edad (ver Tabla 3.26). La posición del tiroides se consideró que estaba en la mitad del cuello. Por tanto, el cálculo de la altura del tiroides en cada

edad (ecuación 3.24) se realizó restando la altura de la cabeza a la altura total y al resultado se le restó la mitad de la altura del cuello (Tabla 3.26).

$$H_{tir} = H - h_{cabeza} - \frac{1}{2} h_{cuello} \quad (3.24)$$

Tabla 3.26: Alturas estimadas de tiroides de las diferentes configuraciones para medir el ^{131}I en el contador Fastscan.

V (ml)	Edad (años)	H (cm) WHO	h cabeza (cm)	h cuello (cm) maniquí	H tiroides (cm)
1.8	1	75	10	7.1	61.5
3.4	5	110	14	8.2	92
7.7	10	138	16	9.6	117
12	15 M*	162	18	10.9	138.5
12	15 H*	169	20	10.9	143.5
17	M*	163	18	12.7	139

*M mujer; H hombre

Los viales de cuello utilizados en la calibración contienen una disolución acuosa de ^{131}I . La posición de cada vial dentro del cuello corresponde a la parte más externa del cilindro de metacrilato y por tanto más cercana al detector. Dependiendo de la altura del cuello se seleccionó el detector (superior o inferior) más adecuado para calibrar.

- Elección de detectores del contador Fastscan

La calibración de ^{131}I en tiroides es de un solo detector, superior o inferior. La elección depende de un estudio de eficiencia realizado con los dos detectores. Cada patrón de cuello se colocó en su altura estimada, que se muestra en la Tabla 3.26 y se han marcado en la Figura 3.33. Se procedió a medir cada configuración con ambos detectores, en el caso del maniquí de cuello de 15 años, que se hicieron dos, la primera, ubicando el maniquí a la altura de tiroides correspondientes a 138.5 cm para la niña y la segunda a la altura de 143.5 cm para el niño. El factor de calibración resultante para la emisión principal de ^{131}I , en 364 keV, es el parámetro usado para la selección del detector. Los resultados obtenidos de las eficiencias se muestran en la Tabla 3.27 y están representados en la Figura 3.34. Las eficiencias más altas en cada caso están señaladas y son las que se consideran para seleccionar el detector más conveniente para calibrar.

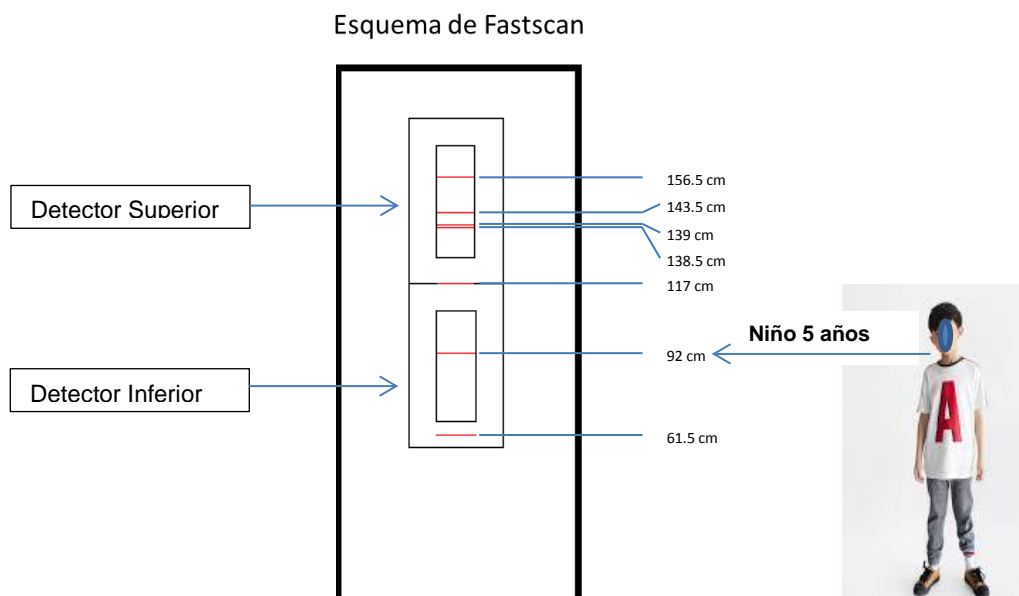


Figura 3.33: Posición relativa de los patrones simuladores de tiroides, dependiendo de la edad, respecto a los detectores superior e inferior del contador Fastscan.

La eficiencia de detección de las configuraciones de 1 y 5 años era mayor en el detector inferior y es el que se calibró para estas edades. En el caso de la configuración de 10 años, las eficiencias correspondientes al detector superior e inferior eran muy parecidas, debido a que la altura del tiroides era 117 cm, correspondiente a la altura del blindaje de los detectores. Por ello, se decidió poner esta configuración sobre un alzador para que quedara el tiroides en la posición del detector superior, a la misma altura que la mujer de 15 años, 144 cm. Este mismo detector, se utilizó para calibrar el tiroides en las configuraciones de 15 años y de adultos.

Tabla 3.27: Factor de calibración de los dos detectores del contador Fastscan para la medida de ^{131}I en la familia de cuellos simuladores de tiroides de distintas edades a una distancia de cuello-detector de 12 cm.

Espectro	Geometría (años)	H (cm)	Cuentas det sup	Δ Cuentas det sup	$F_{\text{eff det sup}}$ (cps/Bq)	$\Delta F_{\text{eff det sup}}$ (cps/Bq)	Cuentas det inf	Δ Cuentas det inf	$F_{\text{eff det inf}}$ (cps/Bq)	$\Delta F_{\text{eff det inf}}$ (cps/Bq)
91304488	1	65	4090	753	0.00046	0.00009	165000	875	0.01867	0.00047
91304494	5	96	17400	280	0.00195	0.00007	270000	1134	0.03021	0.00073
91304497	10	122	177000	920	0.00992	0.00025	165000	891	0.00925	0.00023
91304500	15 M*	144	399000	1357	0.02667	0.00062	29400	403	0.00197	0.00007
91304505	15 H*	149	342000	1265	0.02286	0.00054	17300	313	0.00116	0.00004
91104249	A M*	145	9120	464	0.04720	0.00335				0.00000
91104548	A H*	163	57100	531	0.04390	0.00129	1310	329	0.00101	0.00027

*M mujer; H hombre

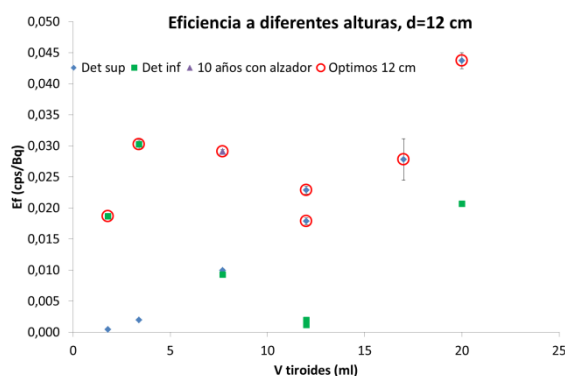


Figura 3.34: Factor de calibración de eficiencia de detección para la emisión de 364 keV para las familias de patrones dependiendo de la edad en el contador Fastscan.

Las calibraciones en eficiencia[80] se realizaron con los patrones simuladores de cuello de mujer adulta y de niños de 1, 5, 10 y 15 años, este último se calibró para hombre y mujer. Las fuentes utilizadas son de ^{131}I , cuyas actividades (ver Tabla 3.15) están certificadas por el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes del Ciemat (LMRI). Se utilizó el mismo certificado de fuentes (ver Tabla 3.20) que se ha editado en el apartado 3.5.2.2 de *Calibración en eficiencia de ^{131}I en tiroides del detector 1 del sistema LEGe*. El método utilizado en la calibración en eficiencia esta descrito en el apartado 2.4.3.

En cada medida de calibración con el detector NaI(Tl) se obtuvo un espectro de ^{131}I (Figura 3.35). La emisión principal es en la energía de 364 keV, a su izquierda se muestra una emisión de menor intensidad en 284 keV, en 80 keV se observa un gran pico que está embebido en el fondo. A la derecha de la emisión principal, en 636 keV, se puede ver un fotopico con menor intensidad de emisión.

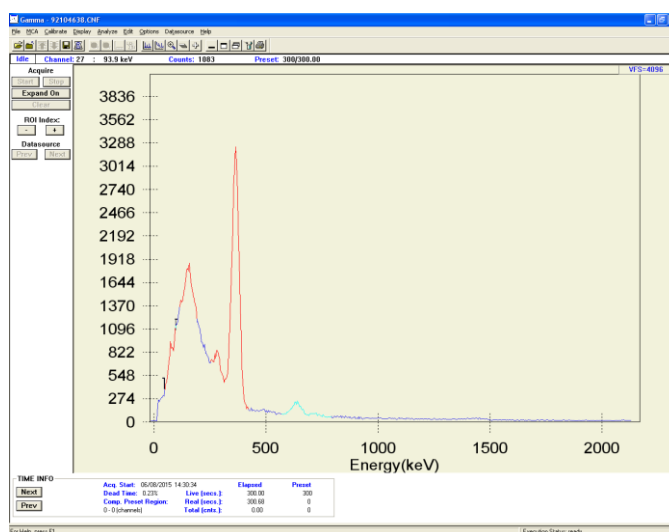


Figura 3.35: Espectro de ^{131}I en tiroides con un detector NaI(Tl) del contador Fastscan.

Las calibraciones se realizaron y guardaron con un nombre descriptivo que se muestra en la Tabla 3.28. La tabla también muestra el nombre del espectro y detector utilizado para cada calibración.

Tabla 3.28: Espectro y fichero de cada una de las calibraciones obtenidas así como los detectores utilizados en la calibración del contador Fastscan para medida de yodo en tiroides en individuos de varias edades

Edad (años)	Espectro calibración (.CNF)	Detector	Fichero de calibración (.CAL)
M*	92104115	Superior	Eff_TirI131_mujer
15 H*	91104504	Superior	Eff_TirI131_nino15y_d18cmH149cm
15 M*	91104499	Superior	Eff_TirI131_nina15y_d18cmH144cm
10	91104633	Superior	Eff_TirI131_nino10y_d18cmH144cm
5	91204493	Inferior	Eff_TirI131_nino5y_d18cmH96cm
1	91204490	Inferior	Eff_TirI131_nino1y_d18cmH65cm

*H hombre; M mujer

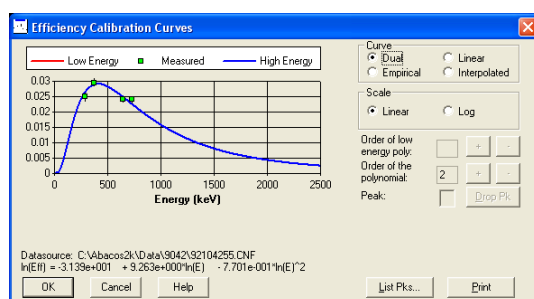
Calibración en eficiencia de medida de ^{131}I en tiroides de mujer adulta

El patrón de cuello de la mujer consiste en un volumen de tiroides de 17 ml representado por un vial con capacidad de 20 ml en el interior del maniquí de cuello de adulto. La geometría de calibración para mujer en el Fastscan consistió en colocar el patrón a una distancia de 12 cm del detector y a una altura del suelo de 139 cm, por lo que quedó a la altura y enfrente del detector superior.

A partir de los picos considerados en la Figura 3.36 se obtiene la curva de calibración en eficiencia para la medida de ^{131}I en tiroides de mujer adulta y está dada por la ecuación 3.25.

$$\ln(\text{Eff}) = -31.39 + 9.263 \cdot \ln(E) - 0.7701 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.25)$$

Curva de eficiencia



Picos considerados

Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
1	284.30	0.02615	0.02491	6.01	5.00
2	364.48	0.02866	0.02929	2.84	-2.13
3	636.97	0.02490	0.02387	3.08	4.31
4	722.89	0.02256	0.02389	4.29	-5.59

Figura 3.36: Curva de calibración de tiroides de mujer y los picos utilizados en el contador Fastscan.

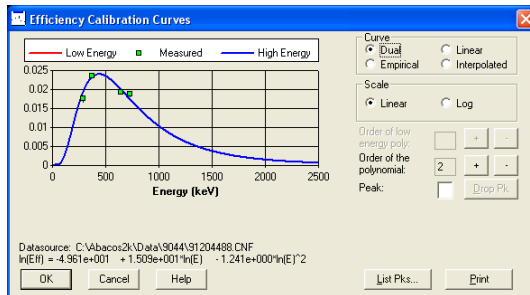
Calibración en eficiencia de medida de ^{131}I en tiroides de niño de 1 año

El volumen de la fuente simuladora del tiroides de la configuración de 1 año es de 1.8 ml. La posición del patrón es de pie a una altura de 61.5 cm, con una distancia al detector de

12 cm. A partir de los picos considerados en la Figura 3.37 se obtiene la curva de calibración en eficiencia para niño de 1 año y está dada por la ecuación 3.26.

$$\ln(\text{Eff}) = -49.61 + 15.09 \cdot \ln(E) - 1.241 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.26)$$

Curva de eficiencia



Picos considerados

Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
1	234.30	0.01899	0.01757	5.33	8.10
2	364.48	0.02295	0.02347	2.03	-2.21
3	636.97	0.02008	0.01920	2.24	4.61
4	722.89	0.01750	0.01888	3.07	-5.82

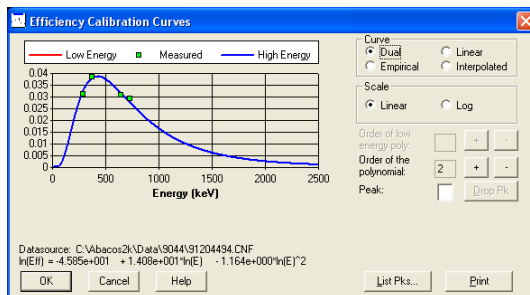
Figura 3.37: Curva de calibración de tiroides de niño de 1 año y los picos utilizados en el contador Fastscan.

Calibración en eficiencia de medida de ^{131}I en tiroides de niño de 5 años

El volumen de la fuente simuladora de tiroides de la configuración de 5 años es de 3.4 ml que se introduce en un vial de capacidad para 7 ml. El grosor del cuello es de 3 mm de metacrilato que atenúa a los fotones procedentes de la fuente de ^{131}I . La posición del patrón es de pie a una altura de 92 cm, con una distancia al detector de 12 cm. A partir de los picos considerados en la Figura 3.38 se obtiene la curva de calibración en eficiencia para niño de 5 años y está dada por la ecuación 3.27.

$$\ln(\text{Eff}) = -45.85 + 14.08 \cdot \ln(E) - 1.164 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.27)$$

Curva de eficiencia



Picos considerados

Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
1	234.30	0.03132	0.03019	3.73	3.72
2	364.48	0.03746	0.03824	2.02	-2.03
3	636.97	0.03176	0.03056	2.15	3.93
4	722.89	0.02766	0.02886	2.68	-4.15

Figura 3.38: Curva de calibración de tiroides de niño de 5 años y los picos utilizados en el contador Fastscan.

Calibración en eficiencia de medida de ^{131}I en tiroides de niño de 10 años

El volumen de la fuente simuladora de tiroides de la configuración de 10 años es de 7.7 ml. El grosor del maniquí de cuello que atenúa a los fotones es de 4.2 mm de metacrilato. La altura del tiroides de un niño de 10 años es de 117 cm, pero como está a la altura del blindaje, se alza el cuello hasta llegar a una altura de 144 cm y utilizar el detector superior. La distancia al detector es de 12 cm. A partir de los picos considerados en la

Figura 3.39 se obtiene la curva de calibración en eficiencia para configuración de 10 años y está dada por la ecuación 3.28.

$$\ln(\text{Eff}) = -47.16 + 14.53 \cdot \ln(E) - 1.204 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.28)$$

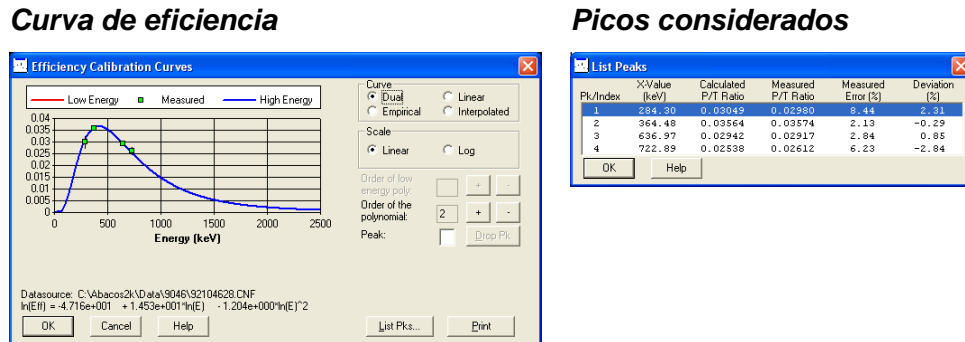


Figura 3.39: Curva de calibración de tiroides de niño de 10 años y los picos utilizados

Calibración en eficiencia de medida de ^{131}I en tiroides de mujer de 15 años

El volumen de la fuente simuladora de mujer de 15 años es de 12 ml y se introduce la fuente de ^{131}I en un vial de 15 ml. El grosor del maniquí de cuello es de 5.4 mm de metacrilato. Se coloca en geometría de pie a una altura de 138 cm, con una distancia al detector de 12 cm. A partir de los picos considerados en la Figura 3.40 se obtiene la curva de calibración en eficiencia para mujer de 15 años y está dada por la ecuación 3.29.

$$\ln(\text{Eff}) = -56.50 + 17.42 \cdot \ln(E) - 1.428 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.29)$$

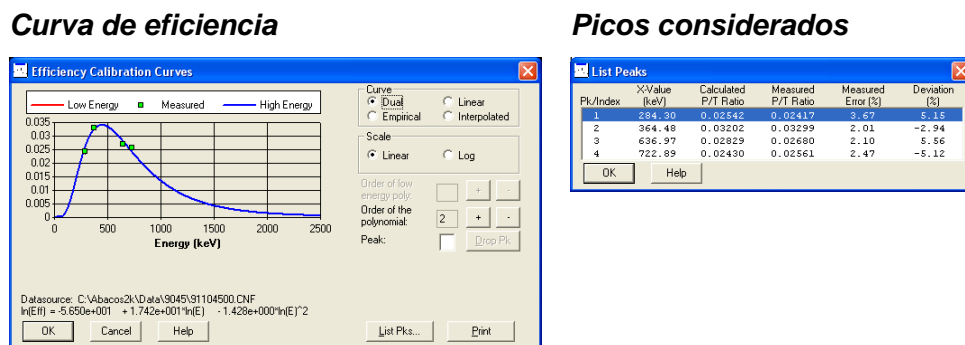


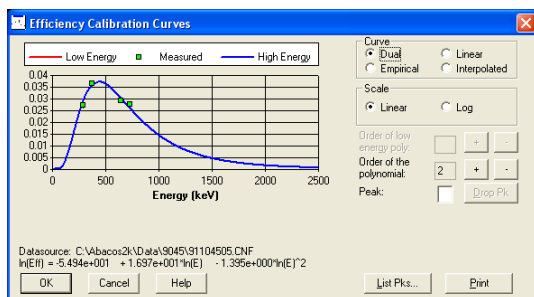
Figura 3.40: Curva de calibración de tiroides de niña de 15 años y los picos utilizados

Calibración en eficiencia de medida de ^{131}I en tiroides de hombre de 15 años

El cuello y vial utilizados para el hombre de 15 años, es el mismo que el de la mujer de la misma edad. La diferencia es su posición en la altura a 143 cm. A partir de los picos considerados en la Figura 3.41 se obtiene la curva de calibración en eficiencia para hombre de 15 años y está dada por la ecuación 3.30.

$$\ln(\text{Eff}) = -54.94 + 16.97 \cdot \ln(E) - 1.395 \cdot \ln(E)^2 \quad (3.30)$$

Curva de eficiencia



Picos considerados

Pk/Index	X-Value (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
1	284.30	0.02845	0.02696	3.96	5.53
2	364.48	0.03628	0.03626	2.02	-2.70
3	636.97	0.03053	0.02902	2.12	5.18
4	722.89	0.02618	0.02757	2.55	-5.02

Figura 3.41: Curva de calibración de tiroides de niño de 15 años y los picos utilizados

Las curvas de eficiencia obtenidas para la distancia de 12 cm cuello detector, con las alturas propias de cada edad simulada, se representan gráficamente en la Figura 3.42. Las curvas de eficiencia de tiroides en el contador Fastscan tienen un comportamiento muy parecido, crecen hasta la energía de unos 400 keV y después descienden, hasta ser muy semejantes a partir de 1000 keV, excepto el caso del cuello de 1 año.

Las calibraciones realizadas con el detector inferior fueron de cuellos simuladores de 5 años y de 1 año. Se observa en la Figura 3.42 que la eficiencia de 5 años es mayor que la de 1 año como no se esperaba. La eficiencia de 1 año es menor porque la altura del tiroides de un 1 año es de 61.5 cm y coincide con la altura del blindaje del detector inferior, por lo que parte de los fotones emitidos por la fuente no atravesaban el blindaje y, por tanto, no llegaban al detector.

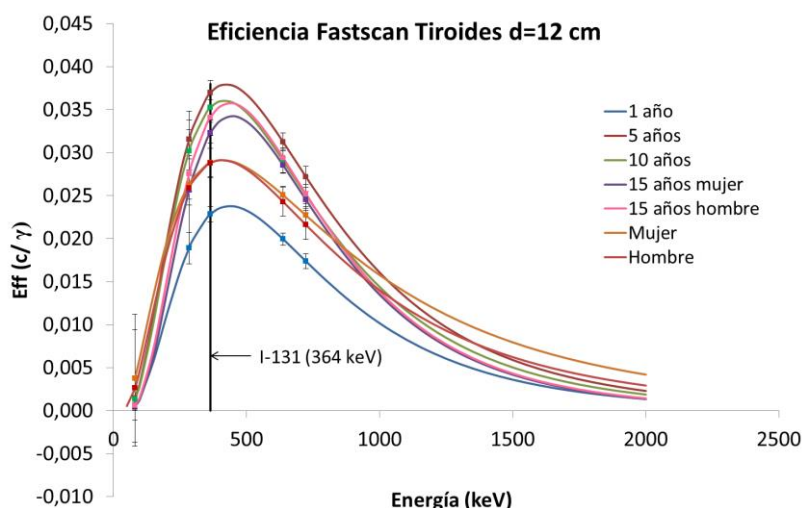


Figura 3.42: Calibraciones en eficiencia en contador Fastscan para todas las configuraciones, con una distancia de 12 cm cuello detector.

La altura del cuello de 10 años y de mujer de 15 años fue la misma, sin embargo, la eficiencia de calibración del primero es ligeramente mayor, la razón está en la diferencia

de volumen del patrón de cuello y de la fuente de tiroides. La diferencia de eficiencia en los dos casos de 15 años es debido a la altura del tiroides. Llama la atención que las eficiencias de 10 años y hombre de 15 años son muy parecidas, a pesar de que la altura y el maniquí+vial son diferentes.

En la Figura 3.43 se ha interpolado el valor de la eficiencia (ver Tabla 3.29) en la emisión principal de ^{131}I , 364 keV. La eficiencia más baja es la del patrón de 1 año, y el máximo ocurre en el niño de 5 años. A pesar de que sus volúmenes no tienen grandes diferencias, pero sí lo tiene la geometría de posicionamiento del tiroides puesto que, como ya se ha dicho antes, la altura del tiroides de 1 año quedó más bajo de la altura del detector y por tanto el número de cuentas que recibió de la fuente era menor de lo esperado. Esto es un tema que se puede mejorar en el futuro. El resto de eficiencias de las diferentes configuraciones fueron decreciendo muy ligeramente con el volumen del vial.

En general, en el contador Fastscan, se puede decir que las calibraciones de adultos, hombre y mujer, son muy parecidas entre sí, así como las de 15 años y 10 años. Las eficiencias de 5 años difieren más y la de 1 año hay que mejorarla.

Tabla 3.29: Eficiencia para los patrones de cuello en 364 keV del equipo Fastscan

V tiroides (ml)	Eficiencia (c/γ)
1.8	0.022834
3.4	0.036963
7.7	0.035254
12 M	0.032312
12 H	0.034102
17	0.028840
20	0.028798

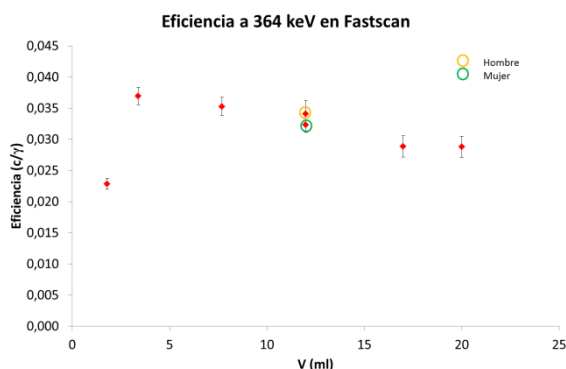


Figura 3.43: Eficiencia de los patrones para una E_{γ} de 364 keV. Las medidas fueron realizadas a la altura que indica la Tabla 3.26 (ver Figura 3.33) y con una distancia detector cuello de 12 cm.

El factor de eficiencia depende fundamentalmente del detector, del tamaño/volumen de la fuente, del posicionamiento de la fuente y de la distancia fuente-detector.

3.5.4.3. Validación de calibración de ^{131}I en tiroides en el contador Fastscan

Se midió de nuevo con los mismos patrones de calibración, y geometría y se analizaron las medidas de ^{131}I con su respectiva eficiencia dependiendo de la edad, obteniéndose las actividades que se muestran en la Tabla 3.30. La exactitud (Br) es menor de 0.03 en todas las configuraciones. En la Figura 3.44 se muestran los valores de la actividad de

referencia y la actividad medida con respecto al volumen de los viales. En dicha figura se compara también la exactitud de las actividades analizadas con su propia eficiencia con las actividades obtenidas con la eficiencia del hombre adulto. Se observa que la exactitud se redujo hasta menos del 3% en todos los casos. Las calibraciones de las nuevas geometrías teniendo en cuenta distintos tamaños de tiroides de acuerdo a los grupos de edad estudiados mejoran la actividad medida en caso de exposición interna en la población.

Tabla 3.30: Medidas de la familia de patrones de cuello a una distancia con el detector de 12 cm, analizadas con la eficiencia de calibración correspondiente al tiroides de cada grupo de edad

Espectro	Edad (año)	Det	ARef (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (Bq)	Br_i	Br
91204488	1	Inf	29460	29956	589	0.0168	0.0168
91204494	5	Inf	29790	30066	596	0.0093	0.0093
92104628	10	Sup	5785	5844	116	0.0102	0.0090
92104629	10	Sup	5785	5835	116	0.0086	
92104630	10	Sup	5785	5892	116	0.0185	
92104631	10	Sup	5785	5771	116	-0.0024	
92104632	10	Sup	5785	5755	116	0.0102	
91104500	15 M*	Sup	49870	50666	997	0.0160	0.0160
91104505	15 H*	Sup	38515	39585	997	0.0278	0.0278
91104250	M	Sup	664	683	10	0.0606	0.0606
						Br	0.0128
						SBr	0.0068

*M Mujer; H hombre

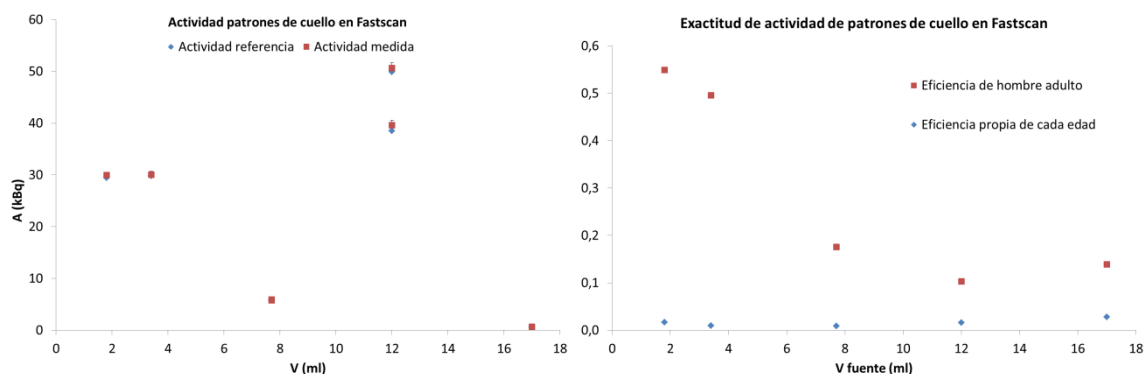


Figura 3.44: Comparativa de actividades de los mismos patrones de cuello medidos con igual geometría que la de calibración y su exactitud, en el contador Fastscan.

Las validaciones de las calibraciones se completaron con las medidas de los viales de ^{133}Ba y ^{137}Cs (distintos de los de calibración) simuladores de tiroides cuyas actividades se exponen en la Tabla 3.16. Las 5 medidas de cada edad se analizaron con su propia eficiencia, obteniendo las actividades que se muestran en la Tabla 3.31 y se representan gráficamente en función de los volúmenes de la fuente simuladora de tiroides en la Figura 3.45. La exactitud para el caso de ^{133}Ba es mejor que para el ^{137}Cs , eso quiere decir que la curva de eficiencia se ajusta mejor a la energía de 356 keV que a la de 661 keV. En todos los casos los resultados de exactitud cumplen los criterios de aceptación de la

norma ISO 28218 cuyo rango es de [-0.25, 0.50]. Destacar que la mayor desviación se obtiene en el caso del tiroides del niño de 1 año.

La calibración en eficiencia para la medida de ¹³¹I en tiroides realizada para cada uno de los cuellos dependiendo de la edad ha mejorado los resultados de la actividad medida, sobre todo en las configuraciones de tamaños/edades más pequeños que son los que tienen mayor diferencia de geometría de contaje (en volumen de la fuente y dimensiones del cuello) con respecto al hombre adulto.

Tabla 3.31: Resultados de las medidas realizadas con los simuladores de ¹³³Ba y ¹³⁷Cs en Fastscan

Espectro	Edad (a)	¹³³ Ba					¹³⁷ Cs				
		Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (%)	Bri	Br	Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (%)	Bri	Br
91205105	1	9481.5	11145.9	3.90	0.18		944.70	1179.6	6.56	0.25	
91205106	1	9481.5	11175.0	3.91	0.18		944.70	1127.0	6.93	0.19	
91205112	1	9481.5	11189.1	3.90	0.18	0.17	944.70	1153.2	6.61	0.22	0.21
91205113	1	9481.5	11198.1	3.90	0.18		944.70	1129.7	6.55	0.20	
91205114	1	9481.5	10944.8	3.91	0.15		944.70	1121.7	6.75	0.19	
91205122	5	9475.8	9322.3	3.68	-0.02		943.6	998.4	5.44	0.06	
91205131	5	9475.8	9552.0	3.76	0.01		943.6	1008.1	5.45	0.07	
91205132	5	9475.8	9282.3	3.66	-0.02	-0.01	943.6	1038.1	5.34	0.10	0.07
91205133	5	9475.8	9478.1	3.67	0.00		943.6	983.6	5.61	0.04	
91205134	5	9475.8	9467.9	3.66	0.00		943.6	1001.7	5.54	0.06	
91205139	10	9514.0	7924.77	4.45	-0.17		947.6	1026.8	7.31	0.08	
91205140	10	9514.0	7704.4	4.45	-0.19		947.6	1002.0	7.34	0.06	
91205147	10	9510.6	9202.9	4.22	-0.03	-0.12	947.5	1031.8	7.28	0.09	0.07
91205148	10	9510.6	9193.7	4.22	-0.03		947.5	1020.3	7.36	0.08	
91205149	10	9510.6	7915.9	4.44	-0.17		947.5	977.0	7.51	0.03	
91205189	15 H*	9530.3	8485.5	3.76	-0.11		949.9	865.4	6.5	-0.09	
91205190	15 H*	9530.3	8959.7	3.76	-0.06		949.9	890.5	6.53	-0.06	
91205191	15 H*	9530.3	9115.7	3.75	-0.04	-0.06	949.9	939.8	6.3	-0.01	-0.03
91205192	15 H*	9530.3	9125.0	3.75	-0.04		949.9	956.7	6.03	0.01	
91205193	15 H*	9530.3	9127.7	3.75	-0.04		949.9	956.2	6.06	0.01	
91205223	15 M*	9526.9	9691.6	3.72	0.02		949.7	973.8	6.39	0.03	
91205224	15 M*	9526.9	9688.6	3.72	0.02		949.7	997.5	6.2	0.05	
91205225	15 M*	9526.9	9647.8	3.72	0.01	0.02	949.7	971.6	6.41	0.02	0.04
91205226	15 M*	9526.9	9761.3	3.72	0.02		949.7	1024.1	5.92	0.08	
91205227	15 M*	9526.9	9633.1	3.72	0.01		949.7	958.8	6.48	0.01	
91205170	M*	9493.6	8960.8	5.55	-0.06		946.0	1125.3	7.06	0.19	
91205171	M*	9493.6	9367.1	5.47	-0.01		946.0	1066.9	7.57	0.13	
91205172	M*	9493.6	9334.5	5.48	-0.02	-0.04	946.0	1073.3	7.44	0.13	0.15
91205173	M*	9493.6	8849.5	5.55	-0.07		946.0	1087.9	7.34	0.15	
91205174	M*	9493.6	9014.5	5.53	-0.05		946.0	1086.8	7.36	0.15	

*M Mujer; H Hombre

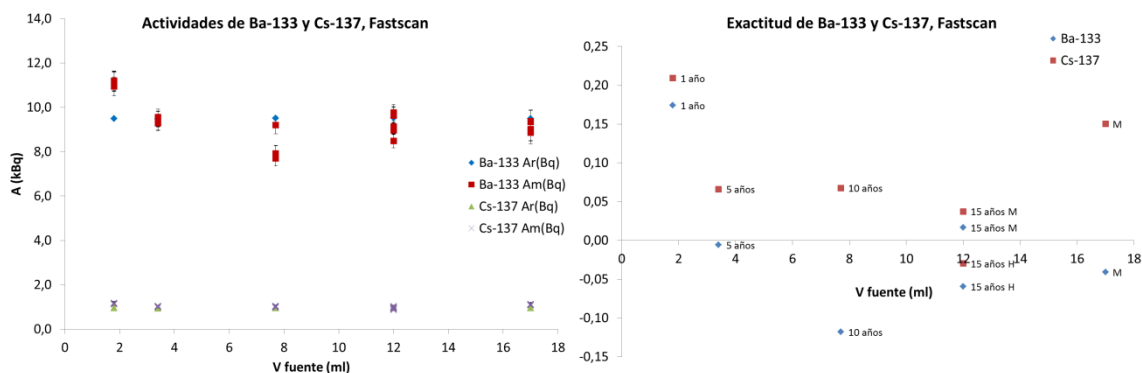


Figura 3.45: Resultado de la exactitud de simuladores de ^{133}Ba y ^{137}Cs de los diferentes patrones en las medidas de validación de la calibración en Fastscan.

3.5.5. Estudios posteriores a la calibración

3.5.5.1. Eficiencia en función de la distancia cuello-detector detector 1 LEGe

Posteriormente a la calibración realicé un estudio de medidas de los cuellos de 1, 5, 10 y 15 años y de hombre adulto sobre la silla de dentista del sistema de detección LEGe, posicionados igual que la calibración anterior, variando la distancia cuello-maniquí a 12 cm (la distancia de calibración del detector LEGe era de 15 cm; la distancia de calibración del FASTSCAN era de 12 cm). El factor de calibración de eficiencia para la emisión principal del ^{131}I , 364 keV, se calculó con la ecuación 2.1 y su incertidumbre con la ecuación 2.3, y los resultados se muestran en la Tabla 3.32. Los factores de eficiencia resultantes se representan gráficamente frente al volumen de la fuente simuladora del tiroides, y se comparan con las obtenidas en la distancia de 15 cm, ver Figura 3.46. Son muy parecidas para los casos de los patrones de 1, 5, 10 y 15 años, aunque ligeramente más eficientes para la distancia de 12 cm, y existe mayor diferencia en el caso del hombre adulto.

Para la distancia de 15 cm cuello-detector, el factor de eficiencia en la energía de 364 keV es prácticamente constante para todas las configuraciones.

Tabla 3.32: Factores de calibración de la eficiencia e incertidumbres de ^{131}I en tiroides para la emisión principal, 364 keV, con el detector 1 de LEGe, la distancia patrón - detector es 12 cm.

Espectro	Edad (años)	Feff (cps/Bq)	ΔFeff (cps/Bq)
36104123	1	0.00200	0.00062
36104124	1	0.00199	0.00062
36104125	1	0.00200	0.00062
36104126	1	0.00200	0.00062
36104127	1	0.00200	0.00062
36104128	1	0.00200	0.00062
36104139	1	0.00220	0.00071
36104140	1	0.00220	0.00071
36104141	1	0.00219	0.00071
36104142	1	0.00218	0.00071
36104143	1	0.00218	0.00071
36104152	1	0.00229	0.00076
36104153	1	0.00230	0.00076
36104154	1	0.00229	0.00076
36104155	1	0.00231	0.00076
36104138	5	0.00202	0.00065
36104137	5	0.00201	0.00065
36104156	5	0.00221	0.00074
36104157	5	0.00220	0.00074
36104158	5	0.00220	0.00074
36104159	5	0.00222	0.00074
36104134	10	0.00142	0.00038
36104136	10	0.00141	0.00038
36104144	10	0.00147	0.00041
36104145	10	0.00146	0.00041
36104146	10	0.00154	0.00044
36104147	10	0.00152	0.00043
36104148	10	0.00153	0.00044
36104149	10	0.00153	0.00044
36104148	10	0.00152	0.00043
36104148	10	0.00153	0.00043
36104133	15	0.00144	0.00042
36104132	15	0.00143	0.00042
36104183	15	0.00192	0.00066
36104185	15	0.00204	0.00071
36104186	15	0.00202	0.00071
36104187	Hombre	0.00333	0.00148
36104188	Hombre	0.00332	0.00147
36104189	Hombre	0.00331	0.00147
36104190	Hombre	0.00329	0.00147
36104191	Hombre	0.00330	0.00147

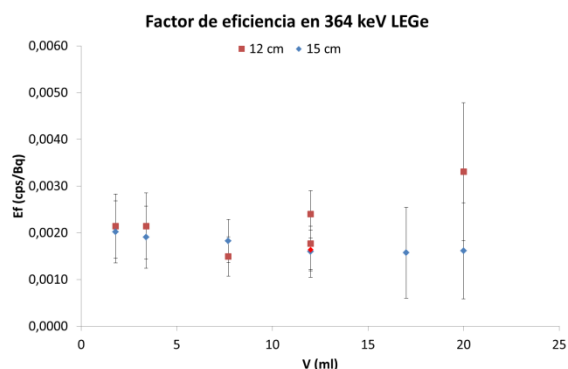


Figura 3.46: Comparativa de factores de calibración de eficiencia del detector 1 LEGe con la geometría de ^{131}I en tiroides con distancias cuello-detector de 12 y 15 cm en la emisión de 364 keV.

3.5.5.2. Eficiencia en función de la distancia cuello-detector en el Contador Fastscan

Las medidas de personas en el Fastscan se hacen con geometría de pie, apoyando la espalda del individuo en la pared trasera del contador, frente a la columna de detectores. La distancia del cuello al detector puede variar dependiendo de la morfología de la persona, desde una distancia máxima de 24 cm hasta 12 cm.

Los patrones de cuello y tiroides de ¹³¹I de 1, 5, 10 y 15 años se colocaron a sus respectivas alturas (Tabla 3.26) se midieron a 18 cm y 24 cm del detector, con el objetivo de determinar la variabilidad de la eficiencia en función de la distancia.

Los factores de eficiencias obtenidos para la emisión principal del ¹³¹I (364 keV) con las diferentes configuraciones en los dos detectores (superior e inferior) del equipo Fastscan se pueden ver en Tabla 3.33 y Tabla 3.34. Comparándolos con los resultados obtenidos en la calibración para 12 cm de distancia detector-cuello, ver Tabla 3.27, se confirmó que a medida que la distancia aumenta la eficiencia disminuye. Otro factor a tener en cuenta es que a medida que aumenta la distancia, la forma geométrica de la fuente reduce su influencia sobre la medida[77].

Tabla 3.33: Calculo de eficiencias para los dos detectores del contador Fastscan a una distancia de 18 cm.

Espectro	Fecha	Geometría (años)	Altura cuello (cm)	Actividad referencia (Bq)	Cuentas det sup	u (%)	Eff Det sup (cps/Bq)	Cuentas det inf	u (%)	Eff Det inf (cps/Bq)
91304490	10/07/2015	1	65	29460	4770	18.02	0.00054	126000	0.61	0.01426
91304493	10/07/2015	5	96	29790	20100	1.61	0.00225	198000	0.49	0.02216
91304496	10/07/2015	10	122	59470	156000	0.55	0.00874	147000	0.58	0.00824
91304499	10/07/2015	15 F*	144	49870	280000	0.41	0.01872	28700	1.39	0.00192
91304504	13/07/2015	15 M*	149	49870	238000	0.44	0.01591	20100	1.67	0.00134

*F es femenino y M masculino

Tabla 3.34: Calculo de eficiencias para los dos detectores del contador Fastscan a una distancia de 24 cm.

Espectro	Fecha	Geometría (años)	Altura cuello (cm)	Actividad referencia (Bq)	Cuentas det sup	u (%)	Eff Det sup (cps/Bq)	Cuentas det inf	u (%)	Eff Det inf (cps/Bq)
91304489	10/07/2015	1	65	29460	6970	6.01	0.00079	100000	70	0.01131
91304492	10/07/2015	5	96	29790	23000	1.52	0.00257	141000	0.58	0.01578
91304495	10/07/2015	10	122	59470	139000	0.58	0.00779	128000	0.62	0.00717
91304498	10/07/2015	15 F*	144	49870	209000	0.47	0.01397	30400	1.36	0.00203
91304503	13/07/2015	15 M*	149	49870	177000	0.51	0.01183	22600	1.58	0.00151

*F es femenino y M masculino

Se realizaron nuevas calibraciones con las distancias detector-cuello de 18 y 24 cm, obteniendo otros valores de eficiencias para 1, 5, 10 y 15 años. Las curvas obtenidas son diferentes para cada patrón de referencia y para cada distancia, se describen a continuación.

Calibración en eficiencia de 1 año

El cuello de 1 año se colocó de pie de forma que la altura del tiroides queda en 61 cm. Las distancias al detector fueron de 18 y 24 cm. Se obtuvieron dos curvas de calibración en eficiencia cuyas ecuaciones son las ecuaciones 3.31 y 3.32, respectivamente.

$$\ln(Eff) = -67.81 + 20.95 \cdot \ln(E) - 1.718 \cdot \ln(E)^2 \quad 18 \text{ cm} \quad (3.31)$$

$$\ln(Eff) = -50.90 + 15.42 \cdot \ln(E) - 1.274 \cdot \ln(E)^2 \quad 24 \text{ cm} \quad (3.32)$$

Calibración en eficiencia de 5 años

El cuello de 5 años se colocó de pie con una altura de tiroides de 92 cm. Las distancias al detector fueron de 18 y 24 cm. Se obtuvieron dos curvas de calibración en eficiencia cuyas ecuaciones son las ecuaciones 3.33 y 3.34, respectivamente.

$$\ln(Eff) = -52.79 + 16.29 \cdot \ln(E) - 1.349 \cdot \ln(E)^2 \quad 18 \text{ cm} \quad (3.33)$$

$$\ln(Eff) = -40.19 + 12.16 \cdot \ln(E) - 1.019 \cdot \ln(E)^2 \quad 24 \text{ cm} \quad (3.34)$$

Calibración en eficiencia de 10 años

El cuello de 10 años se colocó de pie sobre un alizador, de forma que el tiroides se quedó a una altura de 138 cm. Las distancias al detector fueron de 18 y 24 cm. Se obtuvieron dos curvas de calibración en eficiencia cuyas ecuaciones son las ecuaciones 3.35 y 3.36, respectivamente.

$$\ln(Eff) = -42.77 + 13.09 \cdot \ln(E) - 1.096 \cdot \ln(E)^2 \quad 18 \text{ cm} \quad (3.35)$$

$$\ln(Eff) = -78.58 + 25.01 \cdot \ln(E) - 2.097 \cdot \ln(E)^2 \quad 24 \text{ cm} \quad (3.36)$$

Calibración en eficiencia de mujer 15 años

El cuello de mujer de 15 años se colocó de pie sobre el suelo, tiene una altura de tiroides de 138 cm. Las distancias al detector fueron de 18 y 24 cm. Se obtuvieron dos curvas de calibración en eficiencia cuyas ecuaciones son las ecuaciones 3.37 y 3.38, respectivamente.

$$\ln(\text{Eff}) = -53.23 + 16.28 \cdot \ln(E) - 1.339 \cdot \ln(E)^2 \quad 18 \text{ cm} \quad (3.37)$$

$$\ln(\text{Eff}) = -52.18 + 15.85 \cdot \ln(E) - 1.304 \cdot \ln(E)^2 \quad 24 \text{ cm} \quad (3.38)$$

Calibración en eficiencia de hombre 15 años

El cuello de hombre de 15 años se colocó de pie sobre el suelo, la altura de tiroides fue de 143 cm. Las distancias al detector fueron de 18 y 24 cm. Se obtuvieron dos curvas de calibración en eficiencia cuyas ecuaciones son las ecuaciones 3.39 y 3.40, respectivamente.

$$\ln(\text{Eff}) = -51.81 + 15.84 \cdot \ln(E) - 1.302 \cdot \ln(E)^2 \quad 18 \text{ cm} \quad (3.39)$$

$$\ln(\text{Eff}) = -45.35 + 13.75 \cdot \ln(E) - 1.142 \cdot \ln(E)^2 \quad 24 \text{ cm} \quad (3.40)$$

Se representaron gráficamente las curvas de eficiencias de las diferentes edades obtenidas para las distancias cuello detector de 18 cm, ver Figura 3.47.

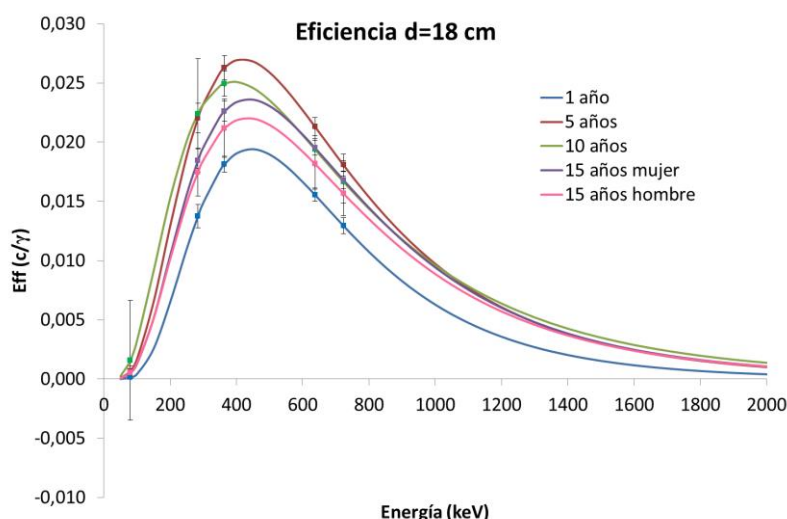


Figura 3.47: Curvas de eficiencia de cuello para las configuraciones de 1, 5, 10, 15 años para 18 cm de distancia al detector del contador Fastscan.

Las formas de las curvas son muy similares con el máximo de eficiencia en torno a 400 keV. A partir de aquí se produce un descenso en eficiencias, y a partir de 800 keV son todas muy parecidas, exceptuando la configuración de 1 año.

En todos los casos la mayor eficiencia corresponde al cuello simulador de 5 años, al igual que en el caso de la distancia de 12 cm, y la menor eficiencia corresponde al cuello de 1 año, debido a que la altura de medida del tiroides coincide con el blindaje del detector inferior.

Se representan las curvas de eficiencias para los diferentes patrones medidos en sus correspondientes alturas a las diferentes distancias al detector, de forma que se obtienen las gráficas de la Figura 3.48. Las eficiencias son mayores cuando la distancia del simulador de cuello con el detector es de 12 cm; la menor es para la distancia de 24 cm, en energías altas, la diferencia de la eficiencia se va reduciendo y llegando a ser muy parecida en todos los casos.

Para los casos de 15 años, la eficiencia es muy parecida en las distancias de 18 y 24 cm. En la distancia de 12 cm la curva de eficiencia difiere más en el máximo. En la calibración de 10 años y la mujer de 15 años el comportamiento de las curvas de eficiencia es similar a pesar de que el patrón es diferente pero se midió en la misma altura, por tanto las diferencias en estos casos se deben a la influencia del volumen de la fuente y de la atenuación del cuello. Se confirma que para distancias más grandes influye menos la forma del patrón de cuello.

Se representa la eficiencia en función de la edad para la energía de 364 keV, correspondiente a la emisión principal del ^{131}I con diferentes distancias del patrón de cuello al detector como se muestra en la Figura 3.49. Las eficiencias más altas son para distancias detector-cuello más pequeñas, a medida que aumenta la distancia las eficiencias van disminuyendo. Como se ha comentado anteriormente, en el caso de 1 año, la diferencia de eficiencias es menor que en el resto de los casos, debido a que la altura de medida del tiroides coincide con el blindaje del detector inferior.

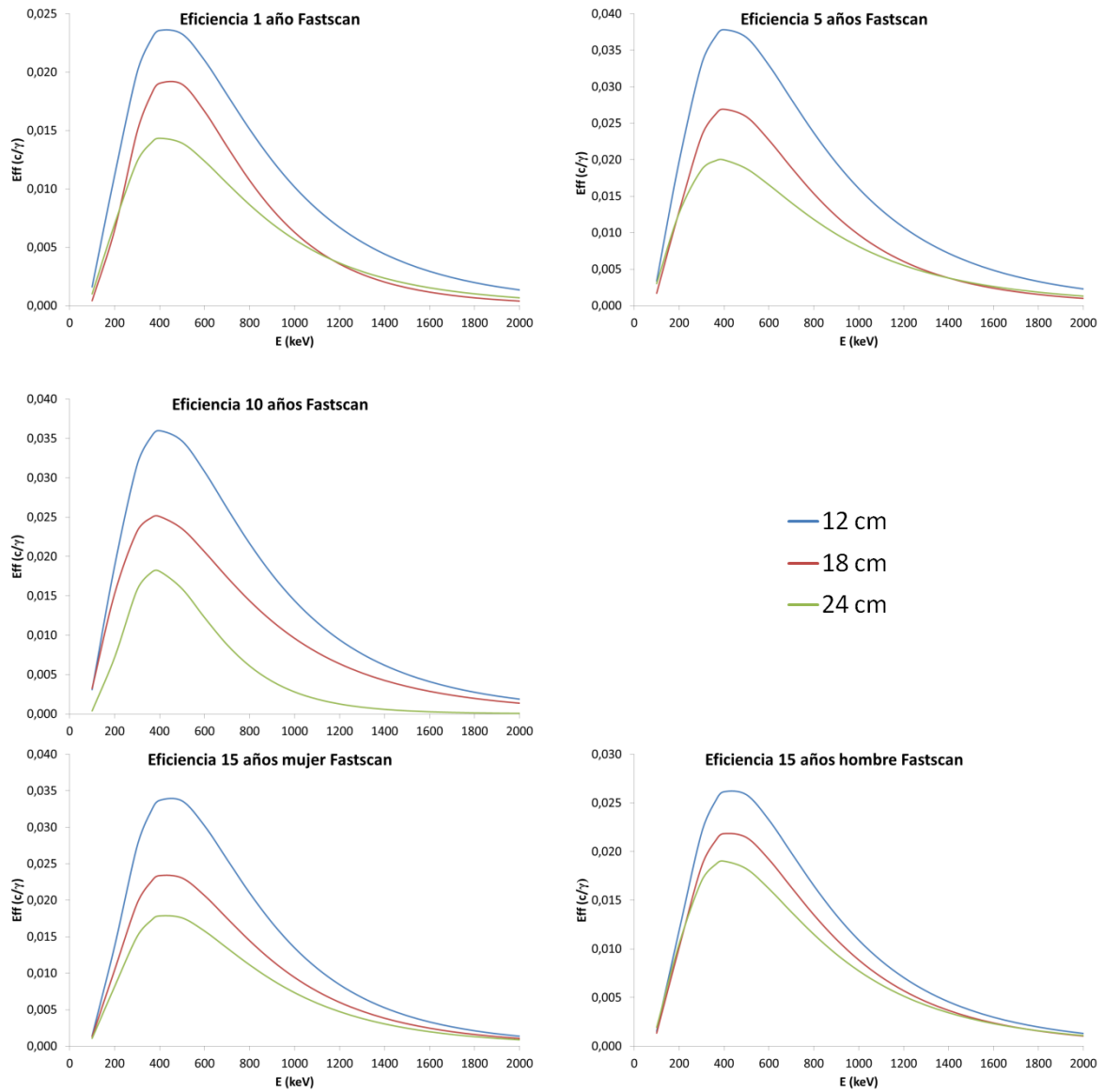


Figura 3.48: Eficiencia de Fastscan para los patrones de cuello de diferentes edades con varias distancias al detector.

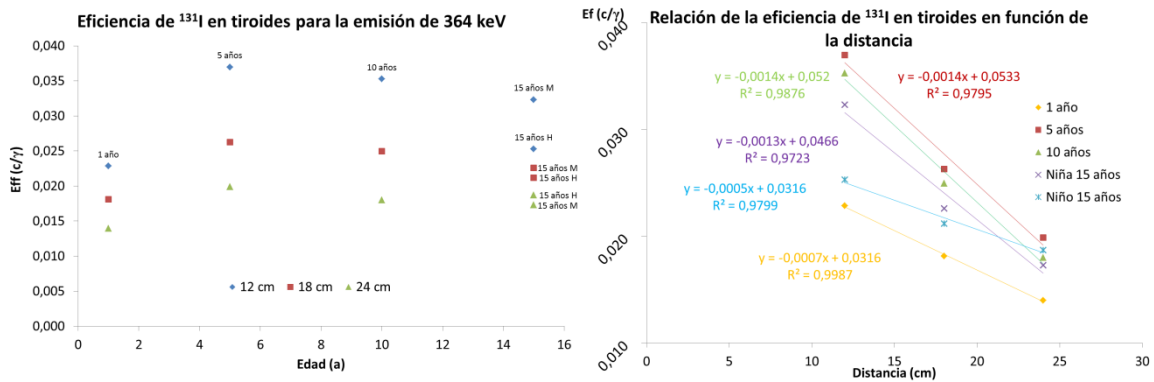


Figura 3.49: Eficiencia de los diferentes patrones de cuello para la emisión principal de ^{131}I en función de la distancia.

La eficiencia de ^{131}I en tiroides se representó en función de la distancia para cada edad, los puntos se ajustaron obteniendo una relación lineal de la eficiencia en función de la distancia. Esta relación permite extrapolar la eficiencia para cualquier distancia según la edad. Las relaciones de las eficiencias para las diferentes edades están dadas por las ecuaciones 3.41, 3.42, 3.43, 3.44 y 3.45.

Calibración en eficiencia de 1 año

$$Ef (c/\gamma) = -0.0007 \cdot d + 0.0316 \quad (3.41)$$

Calibración en eficiencia de 5 años

$$Ef (c/\gamma) = -0.0014 \cdot d + 0.0533 \quad (3.42)$$

Calibración en eficiencia de 10 años

$$Ef (c/\gamma) = -0.0014 \cdot d + 0.052 \quad (3.43)$$

Calibración en eficiencia de mujer 15 años

$$Ef (c/\gamma) = -0.0013 \cdot d + 0.0466 \quad (3.44)$$

Calibración en eficiencia de hombre 15 años

$$Ef (c/\gamma) = -0.0005 \cdot d + 0.0316 \quad (3.45)$$

La eficiencia de calibración depende de la distancia de la fuente con el detector. Las ecuaciones resultantes permiten obtener la eficiencia en la emisión principal del ^{131}I (364 keV) en tiroides de diferentes edades en función de la distancia de medida.

Se realizaron medidas de la familia de patrones de cuello a las distancias del patrón de cuello-detector de 12, 18 y 24 cm que fueron analizadas con las eficiencias de las calibraciones de 12, 18 y 24 cm.

En la Tabla 3.35 se muestran las actividades analizadas con la eficiencia de 12 cm. Se observa que a medida que se aumenta la distancia de medida, la desviación de la actividad con respecto a la actividad de referencia es mayor; se infravalora la actividad entre 21-31 % para las medidas con la distancia de 18 cm, y entre 37-49 % para las actividades medidas de una distancia de 24 cm.

Tabla 3.35: Medidas de actividad de cuello a diferentes distancias con el detector y analizado con la eficiencia de 12 cm.

Distancia detector-cuello (cm)	Espectro	Geometría (años)	H cuello (cm)	Análisis con Eficiencia de 12 cm			
				Aref (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (Bq)	Bri
12	91204488	1	65	29460	29956	1171	0.0168
12	91204494	5	96	29790	30066	1146	0.0093
12	92104629	10	144	5785	5835	256	0.0086
12	91104500	15 M*	144	49870	50666	1905	0.0160
12	91104505	15 H*	149	38515	39585	1496	0.0278
18	91304490	1	65	29460	22991	894	-0.2196
18	91304493	5	96	29790	22064	843	-0.2593
18	92104635	10	144	5785	4032	183	-0.3031
18	91304499	15 M*	144	49870	35532	1343	-0.2875
18	91304504	15 H*	149	38515	27643	1050	-0.2823
24	91204489	1	65	29460	18446	730	-0.3739
24	91204492	5	96	29790	15860	609	-0.4676
24	92104639	10	144	5785	2978	139	-0.4852
24	91104498	15 M*	144	49870	26505	1007	-0.4685
24	91304502	15 H*	149	38515	20409	780	-0.4701

*M mujer; H hombre

Se realizó el análisis de las mismas medidas con la eficiencia de 18 cm, ver Tabla 3.36. La desviación de las actividades medidas con una distancia detector-cuello de 12 cm se sobrevalora entre 31-47 %, y para las medidas del patrón con una distancia al detector de 24 cm se infravalora entre 18-26 %.

Tabla 3.36: Medidas de actividad de cuello a diferentes distancias con el detector y analizado con la eficiencia de 18 cm.

Distancia detector-cuello (cm)	Espectro	Geometría (años)	H cuello (cm)	Análisis con Eficiencia de 18 cm			
				Aref (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (Bq)	Br
12	91204488	1	65	29460	38806	1513	0.3172
12	91204494	5	96	29790	41204	1570	0.3831
12	92104629	10	144	5785	8400	382	0.4520
12	91104500	15 M*	144	49870	71303	2681	0.4298
12	91104505	15 H*	149	38515	56640	2141	0.4706
18	91304490	1	65	29460	29789	1007	0.0112
18	91304493	5	96	29790	29789	1141	0.0000
18	92104635	10	144	5785	5804	273	0.0033
18	91304499	15 M*	144	49870	50004	1890	0.0027
18	91304504	15 H*	149	38515	39553	1499	0.0270
24	91204489	1	65	29460	23895	944	-0.1889
24	91204492	5	96	29790	21735	837	-0.2704
24	92104639	10	144	5785	4287	208	-0.2589
24	91104498	15 M*	144	49870	37301	1414	-0.2520
24	91304502	15 H*	149	38515	29202	1116	-0.2418

*M mujer; H hombre

En la Tabla 3.37 se muestra los resultados de las actividades de las mismas medidas, calculadas con la eficiencia correspondiente a la distancia cuello-detector de 24 cm. Se

observa que la desviación de la actividad en las medidas del patrón de cuello a 12 cm del detector se sobrevalora entre 63-97 %, y para el caso de 18 cm se sobrevalora la actividad entre 25-37 %.

Tabla 3.37: Medidas de actividad de cuello a diferentes distancias con el detector y analizado con la eficiencia de 24 cm.

Análisis con Eficiencia de 24 cm							
Distancia detector cuello (cm)	Espectro	Geometría (años)	H cuello (cm)	Aref (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (Bq)	Br
12	91204488	1	65	29460	48088	1933	0.6323
12	91204494	5	96	29790	56013	2190	0.8803
12	92104629	10	144	5785	11374	548	0.9661
12	91104500	15 M*	144	49870	96387	3711	0.9328
12	91104505	15 H*	149	38515	75683	2929	0.9650
18	91304490	1	65	29460	36905	1473	0.2527
18	91304493	5	96	29790	41104	1615	0.3798
18	92104635	10	144	5785	7859	391	0.3585
18	91304499	15 M*	144	49870	67595	2609	0.3554
18	91304504	15 H*	149	38515	52851	2056	0.3722
24	91204489	1	65	29460	29611	1205	0.0051
24	91204492	5	96	29790	29546	1164	-0.0082
24	92104639	10	144	5785	5805	294	0.0035
24	91104498	15 M*	144	49870	50424	1956	0.0111
24	91304502	15 H*	149	38515	39020	1526	0.0131

*M mujer; H hombre

Las exactitudes de las actividades analizadas con la eficiencia correspondiente a la misma geometría son muy bajas (Figura 3.50). Sin embargo, cuando el análisis se realiza con la eficiencia correspondiente a una distancia más grande, se sobrevalora la actividad calculada, por el contrario cuando se utiliza la eficiencia de calibración de una distancia más pequeña se infravalora la actividad.

A la hora de elegir la calibración de análisis de la medida habría que tener en cuenta que para medir a las personas de ¹³¹I en tiroides en el contador Fastscan la morfología de las personas hace que la distancia de cuello al detector sea diferente en cada caso. El tiempo de medida en rutina es de 5 minutos en la geometría de pie. Por ello, sería recomendable utilizar la calibración más adecuada en cada geometría de medida, dependiendo de la distancia entre el cuello-detector para que los valores de la actividad medida se ajusten mejor a la actividad de referencia.

En este sentido, también se podría utilizar el factor de calibración correspondiente a la emisión de 364 keV, según las relaciones obtenidas en la Figura 3.49, a través de la interpolación de la eficiencia en función de la distancia de cada medida, para el cálculo de la actividad del ¹³¹I.

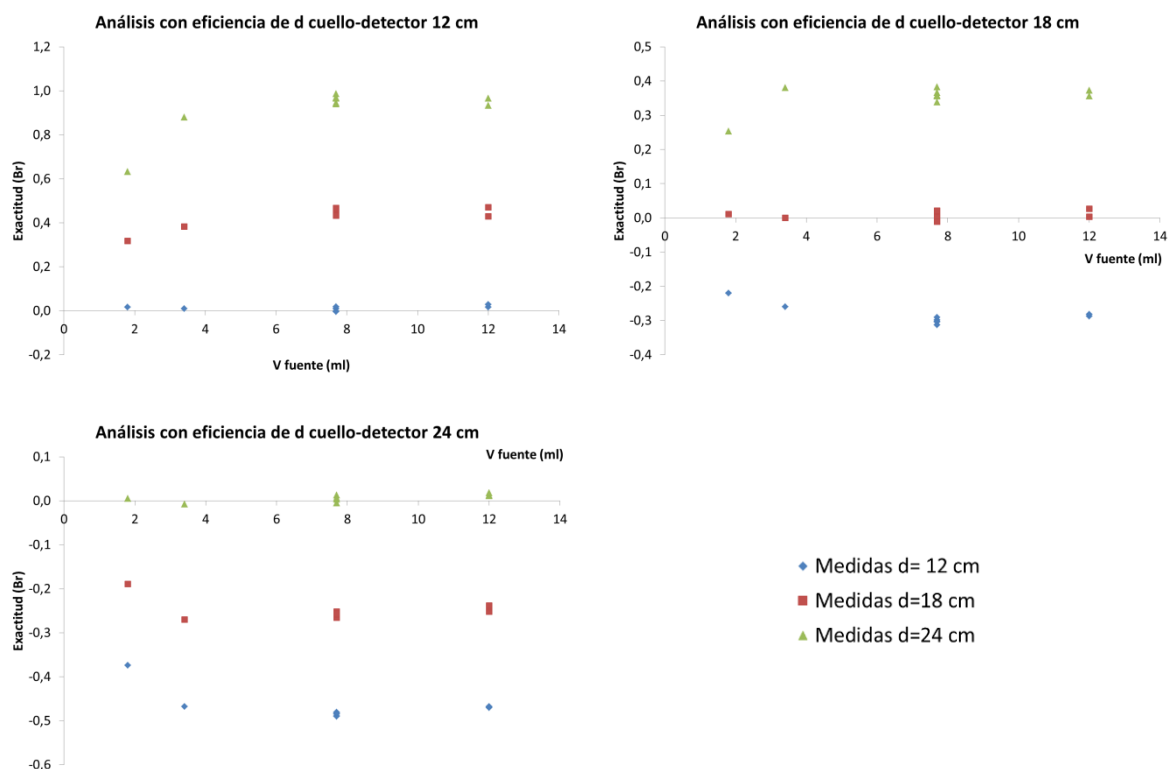


Figura 3.50: Exactitud de las medidas analizadas con los factores de eficiencia correspondientes a diferentes distancias

Si la contaminación corresponde a más de un radioyodo, no se puede utilizar el factor de la eficiencia en la emisión de 364 keV del ^{131}I , habría que interpolar la eficiencia de la curva de calibración (ver Figura 3.48) para la energía de emisión correspondiente. En este caso, sería adecuado medir con el detector 1 del tipo LEGe calibrado para tal fin, por la excelente resolución que caracteriza a los detectores de semiconductor de germanio.

3.5.5.3. Eficiencia en función del espesor de cuello en el contador Fastscan

Se realizó un estudio de la eficiencia en función del espesor de cuello (tejido que cubre el tiroides). Para ello, se utilizó las medidas realizadas con los patrones de la familia de cuellos en la geometría de hombre adulto, 157 cm de altura, a una distancia de 12 cm con el detector superior. Los resultados del factor en eficiencia en la emisión principal de ^{131}I , 364 keV, se muestran en la Tabla 3.38.

El factor de la eficiencia puede estar influenciado por el espesor de cuello. Se representa gráficamente la eficiencia en 364 keV en función del espesor de cuello en la Figura 3.51. El factor de la eficiencia obtenido oscila entre 0.024-0.033 cps/Bq, en los casos de 1 y 5 años se midieron con el detector inferior y de 10, 15 años y mujer se midieron con el detector superior. Por tanto, como cabía esperar, el espesor tiene una ligera influencia en la eficiencia, pero no muy relevante.

Tabla 3.38: Factor de eficiencia en la emisión principal de ^{131}I , 364 keV, de los patrones de cuellos con geometría de pie de hombre a la altura del tiroides de 157 cm y 12 cm de distancia con el detector superior del contador Fastscan.

Edad (años)	Espesor cuello (mm)	Feff (364 keV) (cps/Bq)
1	21	0.0339
5	30	0.0327
10	42	0.0256
15	54	0.0241
Mujer	50	0.0251

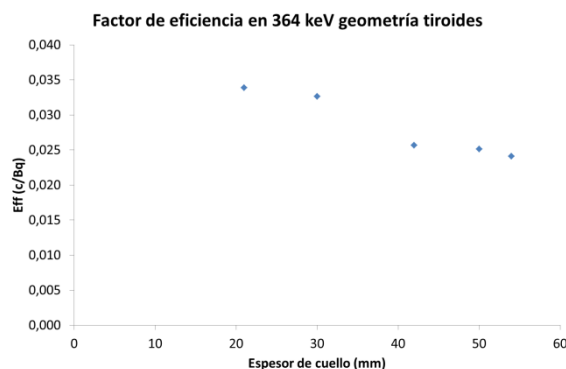


Figura 3.51: Factor de eficiencia en detector superior del contador Fastscan, dependiendo del espesor de cuello.

3.6. Validación de la metodología de calibración y medida del CRC-CIEMAT y de los maniqués de cuello

Los maniqués diseñados y fabricados en el CIEMAT de 5 y 10 años se validaron a partir de los resultados de la intercomparación realizada en el grupo de trabajo WP4, dentro del proyecto CATHYMARA[90], referencia OPERRA 604984, financiado por la Comisión Europea en el marco de EURATOM (7PM, 2016-2017). El CIEMAT fue miembro del consorcio internacional de instituciones del proyecto y concretamente el CRC participó en un ejercicio de intercomparación consistente en realizar medidas con equipos no espectrométricos (monitores de radiación, gamma cámara de hospitales) de los patrones de cuello y tiroides fabricados por el SCK-CEN (Belgian Nuclear Research Centre) simuladores de la contaminación de ^{131}I en tiroides de varias edades.

El laboratorio del CRC recibió el maniquí cuello del SCK-CEN, simulador de los tiroides del hombre adulto y de los niños de 5 y 10 años, que se midió con los equipos LGE y Fastscan, de forma que aunque esta tarea no entraba dentro del objetivo del proyecto CATHYMARA, se aprovechó esta oportunidad para validar los maniqués de tiroides fabricados por CIEMAT escalados por edad. Los patrones de cuello del SCK-CEN consisten en un cilindro de metacrilato en el que se simulan los 3 patrones como se muestra en la foto de la Figura 3.52 y el esquema en la Figura 3.53.

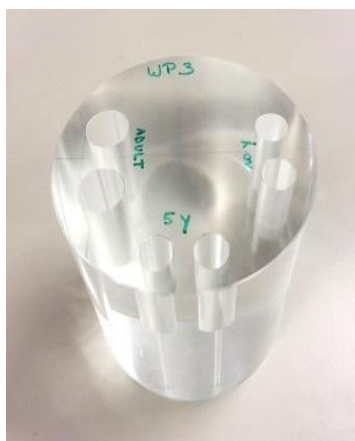


Figura 3.52: Maniquí de cuello de adulto, 5 y 10 años del SKC-CEN

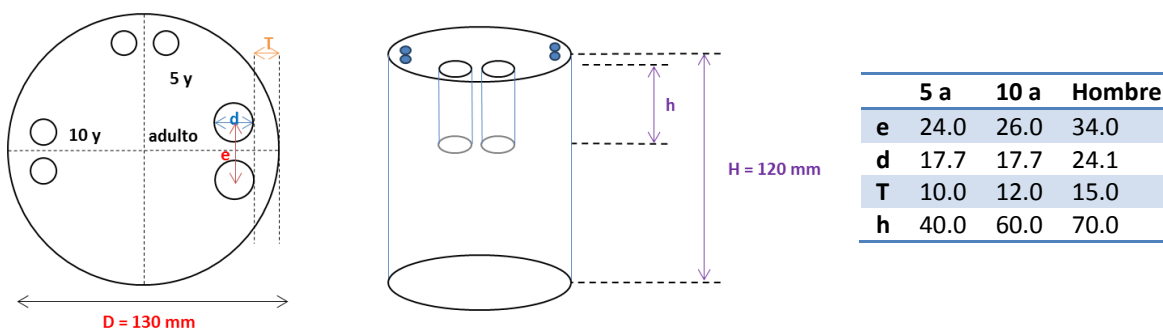


Figura 3.53: Esquema del maniquí de cuello SKC-CEN que muestra los tres pares de agujeros para las configuraciones de 5 y 10 años y adulto y sus dimensiones. Fuente: SKC-CEN

Para cada patrón se rellena un par de huecos con el par de viales cilíndricos correspondiente al cuello de la edad a simular (los dos huecos simulan los lóbulos de un tiroides humano), de forma que para cada caso tienen un tamaño de tiroides simulado diferente, para 5 años (2×1.6 ml), 10 años (2×3.75 ml) y adulto (2×9.5 ml), basados en los volúmenes que recomienda la publicación ICRP 89[56]. Los viales están rellenos de una disolución líquida de ^{133}Ba y ^{137}Cs , están sellados y por tanto son fuentes encapsuladas, ver Figura 3.54. Las actividades de las fuentes de ^{133}Ba y ^{137}Cs en cada edad son la suma de las actividades de cada vial, par de viales, con los valores de la Tabla 3.39.

Realicé 5 medidas para cada cuello simulador SKC-CEN con el detector LEGe. La geometría de medida, en todos los casos, es la misma que la de calibración: el maniquí de cuello bajo el detector, separados una distancia de 15 cm y el tiempo de medida es de 20 minutos.



Figura 3.54: Viales de tiroides de 5, 10 años y adulto, del SKC-CEN

 Tabla 3.39: Actividad de las fuentes con una incertidumbre ($k=1$) del 3 %, con fecha 1 de enero de 2016.

	Referencia	Actividad (Bq)	
		^{133}Ba	^{137}Cs
5 años	L39600-L39601	2601.3	294.4
10 años	L39606-L39607	5911.1	668.9
Hombre	L39612-L39613	14735.3	1667.5

 Tabla 3.40: Medidas realizadas en el detector LEGe de los patrones del SKC-CEN simuladores de la contaminación de tiroides por ^{131}I , utilizados en la intercomparación del proyecto CATHYMARA

Espectro	Edad (a)	^{133}Ba					^{137}Cs				
		Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (%)	Br	SBr	Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (%)	Br	SBr
36104455	5	2536.8	2094	4.58			291.80	91	43.74		
36104456	5	2536.8	2158	7.26			291.80	229	27.34		
36104457	5	2536.8	2197	4.48	-0.16	0.02	291.80	303	12.4	-0.18	0.30
36104458	5	2536.8	2154	4.49			291.80	291	12.59		
36104476	5	2521.3	2062	4.57			291.20	277	13.12		
36104462	10	5763.4	4967	3.70			663.00	641	8.77		
36104469	10	5734.4	4661	3.44			661.80	619	9.01		
36104470	10	5734.4	4788	3.73	-0.17	0.02	661.80	590	9.12	-0.09	0.04
36104471	10	5734.4	4683	3.75			661.80	604	9		
36104472	10	5734.4	4768	3.73			661.80	572	9.29		

La Tabla 3.40 muestra las actividades resultantes de los cuellos Cathymara de 5 y 10 años obtenidas con el detector LEGe 1 analizadas con las eficiencias de sus respectivas calibraciones, la actividad de referencia de cada simulador de tiroides calculado por decaimiento radiactivo, según la ecuación 2.4 en la fecha de medida, su incertidumbre ($k=2$), la exactitud y precisión calculadas para el ^{133}Ba y ^{137}Cs .

En el caso del ^{133}Ba , que tiene la emisión energética principal en 356 keV y la intensidad de emisión del 82 %, la comparación de las actividades medidas y de referencia en la exactitud (Br) fue mayor del -0.17 y la precisión (SBr) menor que 0.02, por tanto dentro de los márgenes de aceptación de la norma ISO 28218[59], Br[-0.25, 0.50] y SBr (<0.4). Para el caso del ^{137}Cs , con la emisión en 662 keV la exactitud obtenida para 5 y 10 años es mayor de -0.18 y la precisión menor de 0.30 ambos están dentro de los márgenes de la norma ISO 28218.

En el caso del contador Fastscan, las 5 medidas del maniquí de 5 años se hicieron en la geometría de calibración, la altura del tiroides de 92 cm, y del de 10 años la altura fue de 138 cm, todas con una distancia al detector de 12 cm, el tiempo fue de 5 minutos para

cada uno de los maniqués de cuello, obteniendo los resultados de la Tabla 3.41, que muestra el nombre del espectro, el patrón medido, la actividad calculada por decaimiento radiactivo en la fecha de medida, el resultado de la actividad, exactitud y precisión obtenidas. Los resultados de la exactitud son menores de 0.26, y precisión menor que 0.05, para el caso del ^{133}Ba , y Br menor del 0.34 y SBr menor de 0.08 para el caso del ^{137}Cs , por lo que ambos casos cumplen los criterios de la norma ISO 28218.

Tabla 3.41: Medidas realizadas en el contador Fastscan de los patrones utilizados en la intercomparación del proyecto CATHYMARA

Espectro	Edad (a)	Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (%)	Br	SBr	Ar (Bq)	Am (Bq)	ΔAm (%)	Br	SBr
91205237	5	2537.2	1826	4.18			291.8	203	16.67		
91205299	5	2522.2	2132	4.02			291.3	193	19		
91205300	5	2522.2	2145	4.03	0.19	0.05	291.3	231	16.1	0.27	0.08
91205305	5	2522.2	2056	4.05			291.3	192	19.35		
91205306	5	2522.2	2057	4.05			291.3	246	14.57		
92105262	10	5737.5	4233	4.70			662.0	588	9.67		
92105263	10	5737.5	4225	4.71			662.0	611	9.25		
92105264	10	5737.5	4223	4.70	0.26	0.01	662.0	554	9.75	0.12	0.04
92105268	10	5736.4	4232	4.72			661.9	566	10.13		
92105269	10	5736.4	4285	4.71			661.9	609	9.39		

Con estos resultados, los dos los maniqués de cuello de los niños de 5 y 10 años fabricados en el CIEMAT quedan validados, al obtenerse resultados de exactitud en los equipos DET LEGe 1 y FATSCAN dentro del rango de aceptación de $[-0.25, +0.50]$ y la precisión, SBr, menor que 0.4, de acuerdo a la norma ISO28218.

3.7. Límite de detección (LD) de ^{131}I en tiroides

Los límites de detección se calculan según el apartado 2.5, a partir de los espectros de medidas de personas blanco o de los maniqués simuladores de fondo tiroideo rellenos de agua.

Las medidas de blancos en los dos sistemas de detección fueron de la misma duración que el tiempo de rutina: el detector 1 del sistema LEGe es 20 minutos (Tabla 3.42), y para el contador Fastscan el tiempo es de 5 minutos (Tabla 3.43). Además, para este último se calcula en distintas distancias del cuello al detector.

Tabla 3.42: Límites de detección de ^{131}I en tiroides para las diferentes configuraciones en el detector 1 del sistema LEGe.

Límite de detección del Detector 1 LEGe				
Distancia 15 cm, tiempo medida de 1200 s.				
Edad (años)	1	5	10	15
LD (Bq)	6.1	4.6	5.3	6.2

Tabla 3.43: Límites de detección de ^{131}I en tiroides para diferentes configuraciones del contador Fastscan, y en diferentes distancias cuello-detector.

Límite de detección del contador Fastscan, tiempo de medida 300 s.			
	12 cm	18 cm	24 cm
1 año	41.9	53.6	65.7
5 años	26.1	39.3	49.1
10 años	25.6	36.9	48.8
15 años niña	27.8	39	53.9
15 años niño	36.2	36.6	48.8

Para el contador Fastscan se obtiene un LD mayor que para el detector 1 del sistema LEGe, pero el tiempo de medida en el Fastscan es menor que en el detector 1 del sistema LEGe. En el caso del Fastscan, el LD aumenta con la distancia de medida. La diferencia de los LD del ^{131}I entre la distancia de 24 cm y la de 12 cm es de unos 20-25 Bq. A pesar de que los LD en el contador Fastscan son más elevados no implican una actividad incorporada que suponga exceder el límite de dosis anual para el público de 1 mSv/año para individuos expuestos medidos en el CRC en los días siguientes al instante de incorporación.

Parte de los métodos y resultados están publicados como *Methodology at Ciemat Whole Body Counter for in Vivo Monitoring of Radioiodine in the Thyroid of Exposed Population in Case of Nuclear Emergency* en la revista Radiation Protection Dosimetry[80], en el congreso de la SEPR de 2017[91] de Girona, y en el congreso ICDA3 de Lisboa de 2019 [92]. La participación en el proyecto CATHyMARA está reflejada en las publicaciones: Deliverable D5.26[93]. *CATHyMARA Report of WP4 about inter-comparison results for non-trained responders. Publicación del informe del grupo de trabajo WP4 del Proyecto Child and Adult Thyroid Monitoring after Reactor Accident (Cathymara) nº de proyecto 604984. Child and adult thyroid monitoring after a reactor accident (CATHyMARA): Technical recommendations and remaining gaps*[94] y *Assessing ^{131}I in thyroid by non-spectroscopic instruments - A European intercomparison exercise*[95].

3.8. Incertidumbres

La incertidumbre de la actividad de ^{131}I en medidas de tiroides se calcula según se explica en el apartado 2.6 teniendo en cuenta la norma ISO 27048[8] y la Guía IDEAS[66]. Las fuentes de incertidumbre más relevantes en este caso son la diferencia del tiroides de la persona contaminada respecto a la forma y dimensiones del tiroides utilizado en la calibración en eficiencias, la distancia detector-tiroides (especialmente en el caso del Contador FASTSCAN) y el movimiento del sujeto durante la medida.

3.9. Conclusiones de medida de ^{131}I en tiroides

Las principales conclusiones de la medida de ^{131}I en tiroides para población expuesta se enumeran a continuación:

1. El laboratorio del Contador de Radiactividad Corporal del CIEMAT ha mejorado sus capacidades de medida de individuos que han incorporado yodo radiactivo al organismo, gracias a las nuevas calibraciones de ^{131}I en tiroides dependientes de la edad de la persona contaminada. Previamente al trabajo de esta tesis el laboratorio únicamente disponía de una calibración de tiroides del hombre adulto, a utilizar en la medida de trabajadores expuestos.
2. Se han estudiado las dimensiones de cuello de niños de 1, 5, 10 y 15 años que han permitido diseñar y fabricar los maniqués de cuello basados en la norma ANSI 13.44[75] y recomendaciones de la ICRP 89[56], con material similar en densidad y coeficiente de atenuación al tejido blando, basados en la publicación ICRU 44[58]. Las fuentes radiactivas para la calibración de radioyodo en tiroides consistieron en disoluciones acuosas de ^{131}I o de su simulador de 90 % de ^{133}Ba y 10 % de ^{137}Cs .
3. Se han analizado las medidas de las configuraciones de cuellos+tiroides de diferentes edades, utilizando la eficiencia del hombre adulto en el detector 1 LEGe y el contador Fastscan, y los resultados indican lo apropiado de disponer de calibraciones determinadas, sobre todo en los casos de 1, 5 y 10 años, con fuentes-patrón específicas de su edad.
4. Se ha confirmado la dependencia de la eficiencia de detección con la distancia maniquí de cuello-detector. También influyen el tamaño de la fuente, el posicionamiento detector-fuente, y en menor medida, influye la forma de la fuente. En el caso del contador Fastscan también influye la altura del individuo. Las eficiencias son mayores para la fuente de volumen menor, y para distancias patrón-detector cercanas.
5. Las eficiencias en las configuraciones de adulto y 15 años son muy parecidas entre sí, en los dos sistemas de detección. Se ha encontrado una diferencia importante de las eficiencias del detector 1 LEGe entre las configuraciones de adulto y 15 años con respecto a las configuraciones infantiles de 1, 5 y 10 años, que a su vez son muy parecidas entre sí. En el caso del contador Fastscan este “escalón” de la eficiencia también se cumple, con valores semejantes por un lado en adultos y 15 años y por

otro lado en los niños de 5 y 10 años. Peor eficiencia se obtiene en el niño de 1 año por efecto blindaje, a mejorar en el futuro aumentando la altura con un alzador.

6. Las nuevas calibraciones de la eficiencia en cada una de las geometrías de adultos y niños permiten un cálculo más realista y fiable de la actividad de ^{131}I depositada en tiroides.
7. Cuando una medida se analiza con una eficiencia correspondiente a una calibración cuya distancia es mayor que la real se sobrevalora la actividad; por el contrario cuando se utiliza la eficiencia de una distancia menor se infravalora la actividad. En el contador Fastscan, para la emisión principal de ^{131}I se han obtenido unas relaciones de la eficiencia en función de la distancia, de forma que se puede extrapolar la eficiencia para cualquier distancia y así poder calcular la actividad en cada caso de forma más realista.
8. La validación de las calibraciones se han realizado con unas fuentes simuladoras de tiroides de ^{133}Ba y ^{137}Cs , diferentes a las de los viales de calibración, con volúmenes para las edades de 1, 5, 10 y 15 años, así como la de mujer adulta. Todos los valores de la exactitud de las actividades calculadas con respecto a las actividades de referencia están dentro del rango de aceptación de la norma ISO 28218[59] de [-0.25, 0.5], por lo que quedan validadas las calibraciones de tiroides en el detector 1 del sistema LGe y del contador Fastscan para los diferentes rangos de edad.
9. El CRC-CIEMAT participó en el proyecto europeo CATHyMARA en 2016-2017, lo que permitió que los maniqués de cuello de 5 y 10 años hayan quedado validados a partir de medidas realizadas con el maniquí SCK-CEN desarrollado para dicho proyecto, con características de diseño muy diferentes.
10. Los límites de detección para la medida de ^{131}I en tiroides son inferiores en el detector LGe (tiempo de medida 20 minutos, dentro de una cámara blindada), sin embargo en el contador Fastscan (tiempo de medida 5 minutos, excelente eficiencia de detección), los LD son más elevados pero no implican que la actividad incorporada detectable suponga exceder el límite de dosis anual para el público de 1 mSv/año. A medida que se aumenta la distancia detector-tiroides, el LD es mayor.
11. El contador Fastscan es el más adecuado para utilizar en emergencias cuando las contaminaciones de ^{131}I se producen a gran escala, por ejemplo por contaminación en una instalación de medicina nuclear de un hospital, con un gran número de individuos

expuestos, porque el tiempo de medida es solo de 5 minutos y se pueden realizar controles de al menos 100 individuos/día en una situación de emergencia nuclear.

12. En caso de contaminaciones complejas se debe utilizar el detector 1 tipo LEGe con el fin de identificar y cuantificar los isótopos contaminantes, al menos en algunos de los individuos que representen grupos de población expuestos por localizaciones. En escenarios de accidente nuclear es muy probable que en los primeros instantes haya emisiones de varios isótopos de yodo cuyas emisiones de rayos X y γ están lo suficientemente próximas como para que sea difícil su correcta identificación con detectores de centelleo tipo NaI(Tl), en estos casos es muy útil medir con detectores de semiconductor LEGe, por su excelente resolución espectrométrica.

Capítulo 4: Medida de emisores gamma en cuerpo entero del público expuesto en emergencia radiológica y nuclear

4.1. Introducción

La fisión nuclear[96] es la reacción que se produce cuando un neutrón incidente es capturado por un núcleo pesado y se divide en dos o más núcleos de átomos más ligeros, en el proceso se emiten neutrones, fotones y grandes cantidades de energía.

Los átomos a partir de los cuales se producen productos de fisión en los reactores nucleares son de uranio, plutonio y torio. Los productos de fisión resultantes son muy diversos, sus números másicos van desde 72 hasta 160. En el caso del isótopo ^{235}U se puede producir hasta 80 productos de fisión diferentes: ^{133}Xe , ^{131}I , ^{99}Mo , ^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{90}Y , ^{132}Te , ^{137}Cs ..., los más destacables se muestran en la Tabla 4.1, que detalla el periodo de semidesintegración y el tipo de decaimiento.

Tabla 4.1: Productos de fisión más representativos que se producen en un reactor. <http://www.nucleide.org>

Isótopo	Periodo de Semidesintegración	Tipo de decaimiento
Estroncio 90	28.4 a	β
Estroncio 89	51 d	β
Cesio 137	30.07 a	γ
Cesio 134	2.06 a	γ, β
Zirconio 93	$1.56 \cdot 10^6$ a	γ
Yodo 129	$1.50 \cdot 10^7$ a	γ, β
Yodo 131	8.02 d	γ, β
Cerio141	33 d	γ, β
Cerio144	285 d	γ, β
Tritio	13 a	β
Bario140	12.8 d	γ, β
Niobio95	35 d	γ, β
Rutenio103	39.7 d	γ, β
Rutenio106	1 a	γ, β

Los productos de activación se producen en el agua de refrigeración de las centrales nucleares, a partir de la interacción de los neutrones con el agua y con el aire. El ^{13}N , ^{16}N y ^{41}Ar contribuyen de forma significativa a aumentar la radiactividad del efluente. Otros productos de activación más influyentes son los que provienen del impacto de los neutrones sobre los metales. Los principales productos de activación que se producen en un reactor nuclear se exponen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Principales productos de activación sólidos. <http://www.nucleide.org>

Isotopo	Periodo de semidesintegración	Tipo de decaimiento
Cromo 51	27.7 d	β, γ
Manganeso54	312.2 d	β, γ
Manganeso 56	2.6 h	β, γ
Cobalto 57	271.8 d	β, γ
Cobalto 60	5.3 a	β, γ
Hierro 59	44.5 d	β, γ
Niquel65	2.5 h	γ
Cobre 64	12.8 h	γ
Zinc65	250 d	γ
Zinc 69	13.8 h	γ
Zirconio95	63 d	γ
Molibdeno99	67 h	γ
Tántalo 182	112 d	γ
Wolframio187	24 h	γ

En caso de incorporación de los productos de fisión y activación en el organismo humano su comportamiento metabólico es diferente en cada caso, y una vez absorbidos en sangre son retenidos en diferentes órganos, según su afinidad[7, 42, 72, 73, 97]. Por ejemplo, el cesio tiene tendencia a permanecer en los músculos. El estroncio imita las propiedades del calcio[7] y su órgano de afinidad es el tejido óseo. El cobalto cuando pasa a sangre se excreta[7] aproximadamente la mitad rápidamente, otro tanto se distribuye en varios órganos tales como hígado, vejiga, riñones, sangre y esqueleto. El hierro una vez que entra en circulación sanguínea es retenido en la médula ósea[7], es incorporado dentro de la hemoglobina y nuevamente vuelve a la circulación sanguínea; pequeñas cantidades permanecen en otros tejidos, principalmente en el hígado. El tecnecio permanece en sangre, hueso, hígado y riñones; todos estos radionucleidos están distribuidos por todo el cuerpo.

Hay radionucleidos que se producen en un ciclotrón. En el ciclotrón se aceleran partículas con el fin de bombardear determinados átomos para obtener artificialmente isótopos radiactivos, normalmente de uso médico.

Los radionucleidos utilizados en medicina nuclear y producidos a través de un ciclotrón son emisores β^+ tales como ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{75}Br y ^{76}Br , con periodos cortos de desintegración, y con producción cercana a los hospitales. También se producen emisores gamma como ^{67}Ga , ^{111}In , ^{123}I , ^{201}Tl con periodos más largos.

En medicina es habitual la obtención de radionúclidos a partir de generadores. Los generadores son sistemas en los que se incorpora un radionucleido que en su desintegración origina otro radionucleido que se utiliza como radiofármaco. El generador

más habitual es $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, aunque también se utilizan otros tales como $^{113}\text{Sn}/^{113}\text{In}$, $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ y $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, todos ellos con emisiones gamma.

Los radionucleidos producidos en el ciclotrón y en el generador tienen su uso principal en medicina nuclear para diagnóstico y terapia, van asociados a un compuesto, lo que se conoce como radiofármaco que lo va a guiar al tejido u órgano de interés del organismo.

Las vías de incorporación de radionucleidos emisores gamma en el organismo son por inhalación, ingestión, a través de la piel o inyección. En el primer momento de la incorporación, la contaminación permanece en los órganos de entrada (pulmones si es inhalación, aparato gastrointestinal si es ingestión). Una vez que la contaminación se transfiere a la sangre, se distribuye por todo el organismo, de forma que una parte se excreta y otra se retiene en los órganos y/o tejidos.

4.2. Objetivo

El objetivo principal es mejorar las capacidades de los equipos disponibles en el Contador de Radiactividad Corporal (CRC) del CIEMAT, en lo que se refiere a la calibración en eficiencias dependiendo de la edad del individuo expuesto, para la medida de emisores γ distribuidos en todo el cuerpo. En lo que se refiere a los patrones de calibración, se han configurado maniqués que simulan el peso y la altura de los niños de 1, 5, 10 y 15 años y de mujer adulta, que corresponden a grupos de población potencialmente expuesta en un escenario de emergencia radiológica o nuclear. Previamente el laboratorio disponía únicamente de la calibración para medida de emisores gamma en organismo total para el hombre adulto (exposición interna ocupacional de trabajadores en el lugar de trabajo).

Se realizó una valoración inicial de las actividades medidas con el sistema de detectores LEGe y contador Fastscan de la familia de maniqués de distintas edades, analizadas con la eficiencia de hombre adulto.

4.3. Materiales

4.3.1. Detectores

Los detectores utilizados para la medida de actividad de radionucleidos emisores γ en geometría de todo el organismo son: (1) los cuatro detectores de semiconductor de germanio tipo “Low Energy Germanium detectors” LEGe, en un rango de detección de 10-2000 keV (ver Figura 4.1), ubicado en el interior de la cámara blindada de bajo fondo radiactivo y (2) el contador Fastscan con dos detectores NaI(Tl), en un rango de

detección del 100-2000 keV. Ambos equipos están ubicados en el laboratorio del CRC del CIEMAT y descritos en el apartado 2.3.



Figura 4.1: Detectores LEGe y cadena electrónica que los soporta, el amplificador en la posición 5, que permite detectar en el rango de energía de 10-2000 keV.

4.3.2. Patrones de calibración de cuerpo entero

Los patrones de las diferentes configuraciones de todo el organismo se consiguieron a partir del maniquí de hombre adulto. Se trata de un maniquí BOMAB (Bottle Mannikin Absorber Phantom), fabricado con polietileno, cuyas dimensiones son un peso de 70 kg y 175 cm de altura, con las especificaciones técnicas de la norma ANSI 13.35[89] y de la publicación ICRU 44[58]. Consiste en 10 contenedores[87] de forma cilíndrica, unos con bases circular y otros con base ovalada (ver Figura 4.2), cuyas dimensiones son diferentes en cada pieza y se pueden consultar en la Tabla 4.3. Cada uno tiene en su superficie lateral un orificio con un cierre de tuerca, por donde se introduce la disolución de agua destilada con un ácido (sulfúrico o nítrico) y las diferentes fuentes radiactivas. La pieza se cierra con un tornillo del mismo material. El ácido ayuda a que las fuentes radiactivas no se adhieran a las paredes del maniquí. Simulando una contaminación homogénea en el interior del organismo.

Tabla 4.3: Dimensiones del maniquí BOMAB según las especificaciones de la norma ANSI 13.35 y del BOMAB HE4 del laboratorio del CRC del CIEMAT.

	ANSI 13.35		BOMAB HE4 hombre	
	Altura (cm)	Peso (kg)	Altura (cm)	Peso (kg)
Cabeza	20	3.4	19.9	4.3
Cuello	10	1.05	10	1.4
Tórax	40	17	40	19.1
Abdomen	20	9.99	20	11.6
Muslo1	40	6.06	40.1	6.9
Muslo2	40	6.06	40.1	6.9
Pierna1	40	3.74	40	4.4
Pierna2	40	3.74	40	4.4
Brazo1	60	3.79	60.1	4.6
Brazo2	60	3.79	60.1	4.6
Adulto	170	58.72	170	68.2



Figura 4.2: BOTTle Mannikin Absorber phantom (BOMAB) en la configuración de hombre adulto y detalle de una pieza.

Las dimensiones de las piezas están descritas en la norma ANSI 13.35[89], para las edades de 4 y 10 años, así como de mujer y hombre adultos, sin embargo, las configuraciones que se han realizado en este trabajo son de las edades de 1, 5, 10 y 15 años, así como de mujer adulta, descritas en la publicación ICRP 89[56]. Las piezas del maniquí BOMAB de hombre adulto son las que se utilizaron para configurar el resto de los maniqués simuladores, teniendo en cuenta el peso y la altura de los niños de diferentes edades y adultos, como se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Recomendaciones de altura y peso para las diferentes configuraciones de la ICRP 89 y los conseguidos con diferentes piezas del maniquí BOMAB.

Configuración	ICRP 89		Piezas utilizadas del BOMAB Hombre	BOMAB		
	H (cm)	P (kg)		H (cm)	P (kg)	H (cm) soporte
1 año de pie	76	10	Cuello+2 brazos	70.1	10.6	70
5 años	109	19	Cuello+2brazos+2piernas	110	19.4	113
10 años de pie	138	32	Cabeza+cuello+abdomen+2piernas+muslo	129.9	33	140
15 años M*	167	56	Cuello+torax+abdomen+2brazos+2muslos	150.2	55.1	159
15 años H*	161	53	Cabeza+torax+abdomen+2muslos+2piernas	160.1	57.6	169
M*	163	60	Cuello+torax+abdomen+1brazo+2muslos+2piernas	150.1	59.3	163
H*	176	73	Cabeza+cuello+torax+abdomen+2brazos+2muslos+2piernas	170	68.2	182

*M mujer; H hombre

Se utilizaron dos maniqués BOMAB: unidades HE2 y HE4. El maniquí BOMAB HE2 lo componen las fuentes radiactivas ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{88}Y , ^{60}Co , cuyas emisiones energéticas e intensidades de emisión se muestran en la Tabla 4.5 y el BOMAB HE4 tiene las fuentes radiactivas ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co con las emisiones energéticas e intensidades de emisión que se encuentran en la Tabla 4.6. El maniquí BOMAB HE2 fue llenado por primera vez el 02/04/2009 con los radionucleidos ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{88}Y , ^{60}Co . Se rellenó de nuevo de los radionucleidos ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{88}Y , ^{60}Co en la fecha

17/07/2014, de forma que para esa fecha tenía las actividades en todo el maniquí y por piezas que se muestran en la Tabla 4.7. El BOMAB HE4 fue llenado con los radionucleidos ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co , en la fecha 17 de noviembre de 2016 (ver Tabla 4.8). Todos los llenados y ampliaciones de radionucleidos en los maniqués BOMAB se han realizado en el laboratorio de Bioeliminación del CIEMAT.

Tabla 4.5: Radionucleidos y principales emisiones gamma del maniquí BOMAB HE2. <http://nucleardata.nuclear.lu.se/>

Radionucleidos	Período de Semidesintegración (d)	Energía (keV)	I _e (%)
^{57}Co	272	122.1*	85.6
		136.5	10.7
^{113}Sn	115	255.1	1.9
		391.7*	64
^{137}Cs	10976	661.6*	85.1
^{88}Y	107	898*	93.7
		1836*	99.2
^{60}Co	1925	1173.2*	100
		1332.5*	100

Tabla 4.6: Radionucleidos y principales emisiones gamma del maniquí BOMAB HE4. <http://nucleardata.nuclear.lu.se/>

Radionucleido	Período de Semidesintegración (d)	Energía (keV)	I _e (%)
Co-57	272	122.1*	85.6
		136.5	10.7
Sn-113	115	255.1	1.9
		391.7*	64
Cs-134	753	475.4	1.49
		563.2	8.35
		569.3	15.38
		604.7*	97.62
		795.9	85.53
		801.9	8.69
		1038.6	0.99
Cs-137	10976	1167.9	1.79
		1365.2	3.01
		661.6*	85.1
Co-60	1925	1173.2*	100
		1332.5*	100

*Emisiones principales de los radionucleidos del BOMAB HE4.

Cada pieza de los maniqués BOMAB fueron rellenos de agua destilada y una pequeña proporción de ácido nítrico para evitar que los radionucleidos se peguen en la pared, las proporciones en volumen en cada pieza de las diferentes sustancias se presentan en el Anexo: Llenado de maniqués de cuerpo entero BOMAB HE2 y HE4.

Teniendo en cuenta las actividades de cada pieza se calcularon las actividades de los diferentes radionucleidos para cada configuración en la fecha de referencia. En el caso de maniquí BOMAB HE2 se muestran en la Tabla 4.9, y son las actividades de referencia

a partir de las cuales se calculó por decaimiento radiactivo la actividad en la fecha de la medida. Las actividades de las configuraciones de maniquí BOMAB HE4 en la fecha 17/11/2016 (ver Tabla 4.10) son las actividades de referencia a partir de las cuales se calcularon las actividades por decaimiento radiactivo en la fecha de medida.

Tabla 4.7: Actividades de los radionucleidos en las diferentes piezas de maniquí BOMAB HE2 en la fecha origen 17/7/2014.

17/7/2014	⁵⁷ Co		¹¹³ Sn		¹³⁷ Cs		⁶⁰ Co		⁸⁸ Y	
	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)
Cabeza	1816.9	111.1	2725.4	177.7	1876.6	73.2	1816.9	69.1	3030.7	172.0
Cuello	488.0	33.4	732.0	39.2	504.0	21.2	488.0	19.4	814.0	37.0
Tórax	8897.7	557.4	13346.6	736.8	9190.2	285.8	8897.7	348.2	14842.0	772.4
Abdomen	5243.1	303.8	7864.7	451.8	5415.4	211.2	5243.1	204.3	8745.9	463.7
Muslo (drcho)	3070.6	185.8	4605.9	257.8	3171.4	123.7	3070.6	121.8	5122.0	265.3
Muslo (izq)	3070.6	185.8	4605.9	257.8	3171.4	123.7	3070.6	121.8	5122.0	265.3
Pierna (drcha)	1848.1	112.9	2772.1	180.1	1908.8	74.4	1848.1	75.6	3082.7	174.3
Pierna (izq)	1848.1	112.9	2772.1	180.1	1908.8	74.4	1848.1	75.6	3082.7	174.3
Brazo (drcho)	1858.4	113.4	2787.7	180.9	1919.4	74.9	1858.4	76.0	3100.0	175.1
Brazo (izq)	1858.4	113.4	2787.7	180.9	1919.4	74.9	1858.4	76.0	3100.0	175.1
HE2 ampliado	30000	733	45000	1021	30980	486	30000	470	50000	1051

Tabla 4.8: Actividades de los radionucleidos en las diferentes piezas de maniquí BOMAB HE4 en la fecha de medida 17/11/2016, corregidas por decaimiento radiactivo.

17/11/2016	⁵⁷ Co		¹¹³ Sn		¹³⁷ Cs		⁶⁰ Co		¹³⁴ Cs	
	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)
Cabeza	1540.4	63.2	2600.4	158.9	1232.4	75.2	616.2	25.3	1232.4	50.4
Cuello	396.1	17.4	668.7	42.9	316.9	20.3	158.4	6.8	316.9	13.6
Tórax	7482.4	247.7	12630.3	723.4	5985.9	317.9	2993.0	122.7	5985.9	198.1
Abdomen	4357.4	163.8	7355.3	391.1	3485.9	212.6	1743.0	71.4	3485.9	142.9
Muslo (drcho)	2552.8	104.7	4309.2	229.1	2042.3	124.6	1021.1	41.9	2042.3	83.7
Muslo (izq)	2552.8	104.7	4309.2	229.1	2042.3	124.6	1021.1	41.9	2042.3	83.7
Pierna (drcha)	1540.4	63.2	2600.4	158.9	1232.4	75.2	616.2	25.3	1232.4	50.4
Pierna (izq)	1540.4	63.2	2600.4	158.9	1232.4	75.2	616.2	25.3	1232.4	50.4
Brazo (drcho)	1518.4	62.3	2563.2	156.6	1214.8	74.1	607.4	24.9	1214.8	49.8
Brazo (izq)	1518.4	62.3	2563.2	156.6	1214.8	74.1	607.4	24.9	1214.8	49.8
BOMAB HE4	25000	361	42200	953	20000	453	10000	172	20000	294

Tabla 4.9: Actividades de las diferentes configuraciones del maniquí BOMAB HE2 en 17/7/2014

Edad (años)	Configuración	⁵⁷ Co		¹¹³ Sn		¹³⁷ Cs		⁶⁰ Co		⁸⁸ Y	
		A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)
1 sentado	Cuello, 2 piernas	4184	461	6276	667	4322	300	4184	294	6980	642
1 de pie	Cuello, 2 brazos	4205	463	6307	670	4343	301	4205	295	7014	645
5	Cuello, 2 brazos, 2 piernas	7901	1106	11852	1664	8161	721	7901	719	13179	1605
10	Cuello, pierna, muslo, tórax	14304	1809	21457	2471	14775	1122	14304	1142	23861	2463
15 M*	Cuello, tórax, abdomen, 2 muslos, 2 brazos	24487	4004	36730	5678	25292	2571	24487	2584	40846	5679
15 H*	Cabeza, tórax, abdomen, 2 piernas, 2 muslos	25795	4504	38693	6494	26643	2901	25795	2893	43028	6463
M*	Cuello, tórax, abdomen, 2 muslos, 2 piernas, brazo	26325	4595	39487	6622	27190	2961	26325	2979	43911	6592
H*	Cabeza, cuello, abdomen, tórax, 2 piernas, 2 muslos, 2 brazos	30000	5844	45000	8608	30986	3782	30000	3786	50042	8513

*M mujer, H hombre

Tabla 4.10: Actividades de las diferentes configuraciones del maniquí BOMAB HE4 en 17/11/2016.

Edad (años)	Configuración	⁵⁷ Co		¹¹³ Sn		¹³⁷ Cs		⁶⁰ Co		¹³⁴ Cs	
		A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)	A (Bq)	ΔA (Bq)
1 sentado	Cuello, 2 piernas	3477	253	5869	631	2782	299	1391	100	2782	201
1 de pie	Cuello, 2 brazos	3433	250	5795	623	2747	295	1373	99	2747	198
5	Cuello, 2 brazos, 2 piernas	6514	606	10996	1517	5211	718	2606	241	5211	483
10	Cuello, pierna, muslo, tórax	11972	957	20209	2387	9578	1148	4789	398	9578	795
10	Cuello, pierna, muslo, tórax	11972	957	20209	2387	9578	1148	4789	398	9578	795
15 M*	Cuello, tórax, abdomen, 2 muslos, 2 brazos	20379	2154	34399	5255	16303	2604	815	891	16303	1781
15 H*	Cabeza, tórax, abdomen, 2 piernas, 2 muslos	21567	2445	36405	5989	17254	2950	8627	1007	17254	2013
M*	Cuello, tórax, abdomen, 2 muslos, 2 piernas, brazo	21941	2487	37036	6093	17553	3002	8776	1024	17553	2048
H*	Cabeza, cuello, abdomen, tórax, 2 piernas, 2 muslos, 2 brazos	25000	952	42200	7842	20000	3831	10000	1303	20000	2606

*M mujer, H hombre

4.3.3. Soportes de maniqués

Para la medida con el sistema de detectores LEGe las piezas del maniquí BOMAB se posicionan en configuración de sentado-semireclinado sobre la silla de dentista del interior de la cámara blindada.

En el contador Fastscan, es necesario un soporte sobre el que colocar las piezas para que el maniquí permanezca en posición de pie. El CRC-Ciemat dispone de un soporte de metacrilato que está estructurado para colocar todas las piezas de maniquí de hombre, con forma de organismo humano. Este mismo soporte se utilizó para colocar varias de las configuraciones dependiendo de la edad del sujeto simulado. Para maniqués más pequeños se utilizaron alzadores para aumentar la altura y mejorar la detección en los detectores superior e inferior. En el caso del niño de un año se utilizó un taburete con una altura de 59 cm.

4.4. Método de calibración de medida de emisores gamma en cuerpo entero

La determinación de la contaminación de emisores γ en el interior del organismo humano consiste en identificar y cuantificar la actividad de los radionucleidos emisores gamma incorporados, que están retenidos en órganos y tejidos dentro del cuerpo.

La calibración de un equipo de detección consiste en dos fases: una calibración de energías y resolución de anchura del pico (FWHM) y otra en eficiencia. Las fuentes utilizadas para la calibración en energía han de tener emisiones dentro del rango energético que detecta el equipo, a poder ser con emisiones simples y bien definidas para poder identificar correctamente el centroide del fotopico. La calibración en eficiencia consiste en medir fuentes con la misma geometría y posicionamiento de la medida real. Por lo tanto, para la calibración de medida de emisores gamma en cuerpo entero se necesitan maniqués que simulen la contaminación interna distribuida uniformemente en el interior del organismo. Los maniqués tipo BOMAB reproducen la contaminación distribuida en todo el organismo de forma homogénea y permiten calibrar los detectores de una forma realista en una posición reproducible para las personas. Esta calibración es adecuada para calcular las actividades de los radionucleidos contaminantes que se han identificado gracias a la calibración en energía.

4.5. Resultados y discusión

La relación de la energía con los canales del espectro permite identificar las energías emisoras de fuentes desconocidas. La calibración en anchura a media altura se realiza simultáneamente a la calibración en energía y consiste en relacionar la anchura a mitad de altura de cada fotopico en función de la energía y es un indicador de la variación de la resolución del equipo en función de la energía.

Por último la calibración en eficiencia permite cuantificar las actividades de los radionucleidos contaminantes. Se realiza midiendo el maniquí simulador del cuerpo entero, en el que se han incorporado las fuentes radiactivas y están distribuidas homogéneamente en el maniquí. La posición del maniquí con respecto a los detectores tiene que ser reproducible para las personas. El contador Fastscan tenía una calibración previa en geometría de todo el organismo para el hombre adulto. Se realizaron nuevas calibraciones del resto de configuraciones en el contador Fastscan y de todas las configuraciones en el sistema LGe. Se utilizaron patrones simuladores de todo el organismo de niños de 1, 5, 10, y 15 años y de mujer, diseñados con las dimensiones específicas en peso y altura y materiales a partir de las piezas del maniquí BOMAB de hombre, teniendo en cuenta las recomendaciones de la publicación ICRP 89[56] y la norma ANSI 13.35[89], como se explica en el apartado 4.3.2.

4.5.1. Calibraciones para determinar emisores gamma distribuidos en cuerpo entero en el sistema LGe

Las calibraciones en energía y eficiencia del sistema LGe[50] se realizaron con un maniquí BOMAB HE4, simulador de todo el cuerpo, descrito en el apartado 4.3.2.

A través del software Abacos 2000 se realiza la medida. Cada detector recoge la señal en forma de espectro. La suma de las señales procedentes de los detectores es un espectro similar al individual en cuanto a picos, pero el área de cada fotopico se ve aumentado aproximadamente cuatro veces la señal individual.

4.5.1.1. Calibración en energía y resolución de anchura del pico (FWHM) del sistema LGe

Para calibrar los detectores del sistema LGe en el rango de energía de 10-2000 keV hay que configurar los cuatro amplificadores de la cadena electrónica de los detectores en la posición 5, de forma que hay 4094 canales y cada canal tiene un ancho promedio de aproximadamente 0.5 keV.

La calibración en energía y FWHM se realizó con el maniquí BOMAB HE4 de hombre adulto, cuyas emisiones energéticas están dentro del rango de detección. El maniquí se colocó sobre la silla semirreclinada que está situada bajo los detectores, ver Figura 4.3. Se realizó una medida simultánea de los 4 detectores obteniendo sus respectivos espectros y la composición de espectros suma: Allsummed, Det 1-2 y Det 3-4, obtenidos de la suma de las señales de los detectores individuales. La suma de todas las señales recogidas en el espectro Allsummed es la que se utilizó para la calibración. Cada pico representado en un canal del espectro, se relacionó con la energía del radionucleido correspondiente, de forma que al representarlo gráficamente (Figura 4.4) se ajustaron los datos a una relación lineal energía-canal (ecuación 4.1).

Simultáneamente a la calibración en energías, el software obtiene la anchura a mitad de altura de cada pico (FWHM), y se vincula con la energía del centroide en cada caso. Representando los resultados en una gráfica (Figura 4.4) se ajustaron los datos a la curva de la ecuación 4.2. El resultado es que la FWHM es más estrecha en las energías más bajas y aumenta ligeramente en las energías más altas, no obstante la resolución en este tipo de detectores es muy alta.

Calibración en energía:

$$E(\text{keV}) = 1.904 + 0.5181 \cdot ch \tag{4.1}$$

Calibración en FWHM:

$$FWHM = 0.0897 + 0.1005 \cdot E^{1/2} \tag{4.2}$$

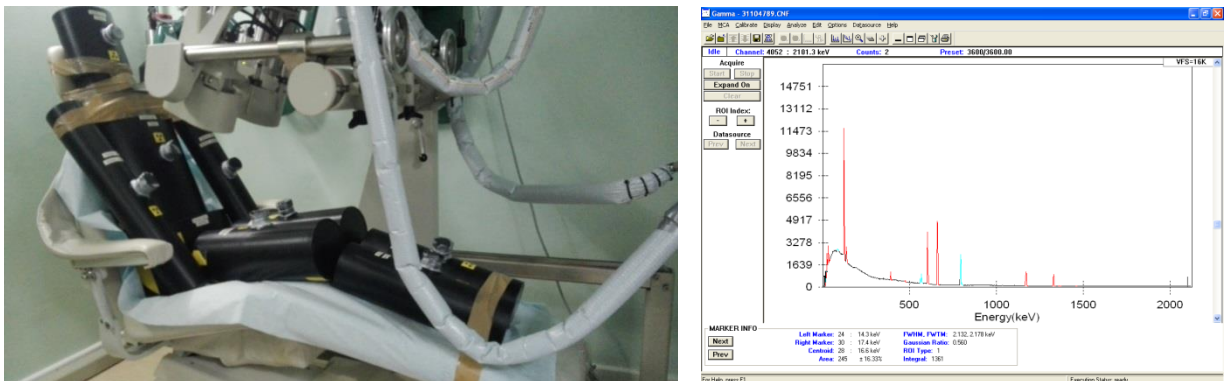


Figura 4.3: Maniquí BOMAB HE4 de calibración de hombre y su espectro en el sistema LEGe.

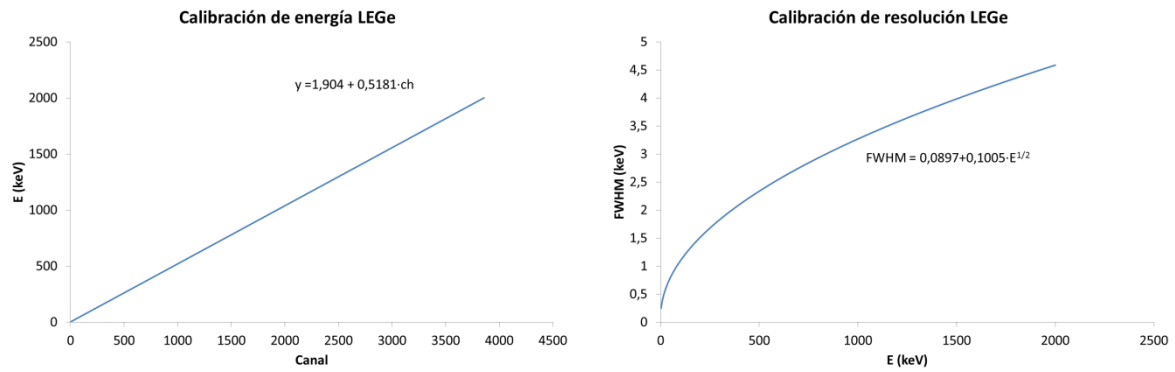


Figura 4.4: Calibración en energía y resolución del pico con la anchura de pico a mitad de altura (FWHM) para el rango energético de 10 keV a 2000 keV del sistema LEGe.

4.5.1.2. Calibración en eficiencia para emisores gamma en cuerpo entero en el sistema LEGe

La calibración en eficiencia de hombre adulto se realizó con el maniquí BOMAB HE4, que consiste en 10 recipientes cilíndricos de polietileno (ver Tabla 4.3) que simulan diferentes partes del cuerpo, para que en su conjunto, y colocado de una forma determinada, tenga la silueta de organismo humano. Las piezas se fueron colocando sobre la silla reclinada de la cámara blindada de bajo fondo radiactivo, bajo los detectores de germanio, LEGe, en geometrías reproducibles para las personas. Las posiciones de los detectores (Figura 4.5) están dadas por su distancia con respecto a la pared de fondo de la cámara siendo 82 cm, 56-77 cm con respecto a la pared lateral, y una inclinación de 23° con respecto a la vertical.

En el resto de configuraciones se utilizaron algunas de las piezas del maniquí, intentando que las alturas, pesos y forma sea lo más parecida posible a las referencias de las edades a calibrar (Tabla 4.4). En cada caso, el maniquí se colocó sentado sobre la silla de dentista en la posición 0, con una distancia del maniquí a los detectores de 30 cm para las configuraciones del hombre, mujer y 15 años. Para las configuraciones de 10, 5 y 1 año se varió la altura de la silla reduciendo la distancia a los detectores a 19 cm. Las geometrías de medida en cada una de las configuraciones son las que se muestran en la Figura 4.5.

Las contaminaciones radiactivas del maniquí BOMAB HE4 se muestran en la Tabla 4.10, y se calcula la actividad en la fecha de medida con la ecuación 2.4 del decaimiento radiactivo. Estas actividades calculadas se utilizaron en los certificados de las fuentes utilizados (Tabla 3.20) para calibrar, siguiendo las instrucciones del apartado 2.4.3.

Tabla 4.11: Certificado de las fuentes radiactivas del maniquí BOMAB HE4 utilizados en calibraciones de cuerpo entero en el sistema LGE.

Edad (años)	Certificado de fuenteHE4 (.CTF)LGE
Hombre	Bomabhe4_hombre_LEGe.CTF
Mujer	OT_Mujer_BomabHe4_Agos.CTF
Niño 15	OT_Hombre_15y_BomabHE4LEGe
Niña 15	OT_Mujer_15y_BomabHe4LEGe.CTF
10	OT_10y_BomabHe4_Agos.CTF
5	Bomabhe4_5y_LEGe.CTF
1	OT_1y_BomabHe4LEGe.CTF

Se realizó la medida *in vivo* en geometría de todo el organismo del maniquí BOMAB HE4, obteniendo un espectro que se utilizó para la calibración, y se muestra en la Figura 4.3. Se observan varias emisiones: 122 keV y 136 keV de ^{57}Co , 392 keV de ^{113}Sn , 605 keV, 796 keV del ^{134}Cs , 661 keV procedente del ^{137}Cs , 1173 keV y 1332 keV del ^{60}Co . La forma de los fotopicos es gaussiana, están muy bien definidos, con una FWHM muy estrecha, lo que muestra la capacidad de resolución del detector. Para calibrar en eficiencia se fue seleccionando el centroide de cada pico en el espectro de calibración identificándolo con cada energía de los radionucleidos de la fuente patrón. El área del pico representa el número de cuentas incidentes en cada energía. Así, el factor de calibración en eficiencias de cada fotopico se calculó con la ecuación 2.1, a partir del número cuentas en la Región de Interés (ROI) de cada pico, dividiéndolo entre el tiempo de medida y la actividad (conocida) de la fuente de calibración. Para obtener una curva en todo el rango energético, es necesario normalizar el factor de calibración, es decir, dividiéndolo entre la intensidad de emisión correspondiente al pico del radionucleido, a través de la ecuación 2.2. Al representarlo gráficamente frente a la energía correspondiente de cada pico se obtienen diferentes puntos que se ajustan a una curva logarítmica, que relaciona la eficiencia con la energía. De esta forma se puede interpolar la eficiencia en cualquier energía del rango calibrado, con el fin de cuantificar la actividad de una fuente emisora gamma desconocida, medida con la misma geometría que la de calibración.

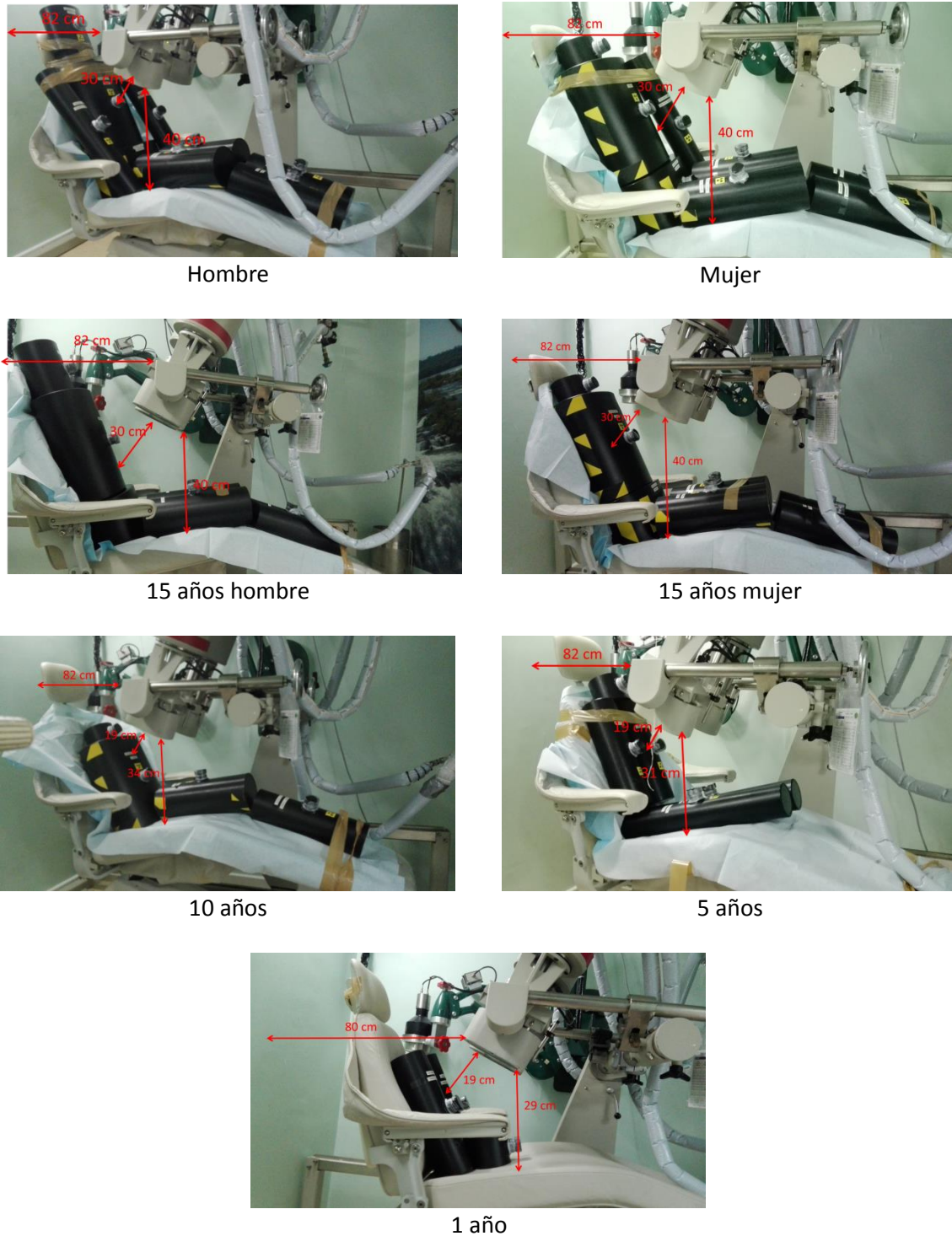


Figura 4.5: Geometrías de las configuraciones de maniquí BOMAB para los organismos de 1, 5, 10 15 años y adultos a partir de las piezas del maniquí BOMAB de hombre en el sistema LEGe.

Los espectros utilizados para las calibraciones en eficiencia en el sistema de detección LEGe en cada una de las configuraciones fueron 31104830.CNF, 31104798.CNF, 31104792.CNF, 31104866.CNF, 31104842.CNF, 31104852.CNF, 31104790.CNF para el niño de 1 año, 5 años, 10 años, la mujer de 15 años, hombre de 15 años, mujer adulta y

hombre adulto, respectivamente. Las curvas de calibración de la eficiencia resultantes están dadas por las ecuaciones 4.3-4.9, y se pueden visualizar en la Figura 4.6.

Calibración en eficiencia de niño 1 año

$$\ln(Eff) = -13.97 + 5.584 \cdot \ln(E) - 1.090 \cdot \ln(E)^2 + 0.06080 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.3)$$

Calibración en eficiencia de niño 5 años

$$\ln(Eff) = -38.48 + 20.99 \cdot \ln(E) - 4.727 \cdot \ln(E)^2 + 0.4388 \cdot \ln(E)^3 - 0.01454 \cdot \ln(E)^4 \quad (4.4)$$

Calibración en eficiencia de niño 10 años

$$\ln(Eff) = -25.29 + 10.72 \cdot \ln(E) - 1.903 \cdot \ln(E)^2 + 0.1035 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.5)$$

Calibración en eficiencia de niña 15 años

$$\ln(Eff) = -481.6 + 313 \cdot \ln(E) - 76.43 \cdot \ln(E)^2 + 8.212 \cdot \ln(E)^3 - 0.3287 \cdot \ln(E)^4 \quad (4.6)$$

Calibración en eficiencia de niño 15 años

$$\ln(Eff) = -1045 + 732.7 \cdot \ln(E) - 199.9 \cdot \ln(E)^2 + 26.1 \cdot \ln(E)^3 - 1.619 \cdot \ln(E)^4 + 0.03668 \cdot \ln(E)^5 \quad (4.7)$$

Calibración en eficiencia de mujer

$$\ln(Eff) = -23.01 + 9.259 \cdot \ln(E) - 1.638 \cdot \ln(E)^2 + 0.0825 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.8)$$

Calibración en eficiencia de hombre

$$\ln(Eff) = -24.32 + 9.830 \cdot \ln(E) - 1.721 \cdot \ln(E)^2 + 0.9216 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.9)$$

La Figura 4.6 muestra el resultado en cada calibración, así como los picos utilizados para ser ajustados a las curvas de eficiencia en las configuraciones, cuya ecuación de la curva de ajuste también se muestra.

Una comparativa de las eficiencias es posible representando las ecuaciones de las curvas resultantes, eficiencia vs energía, en forma logarítmica, ver Figura 4.7. Se observa que sus comportamientos son muy similares, son crecientes para las energías muy bajas, tienen un máximo para energías de aproximadamente 90 keV, a partir de esta energía decrecen de forma asintótica. Las geometrías de niños de 1 año, 5, 10 y 15 años tienen eficiencias muy parecidas en todo el rango energético excepto para energías entre 20-300 keV que es donde más difieren. Sin embargo, los casos de 15 años, mujer y hombre,

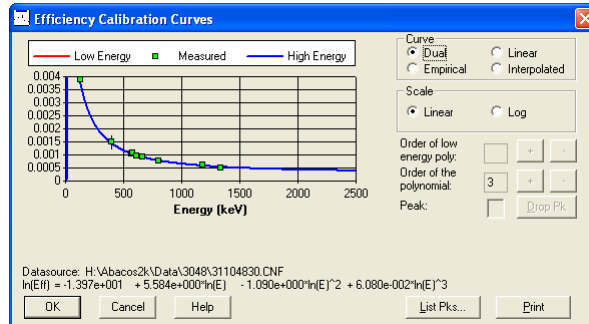
la diferencia es menor, son muy parecidos en todo el rango energético, aunque donde más difieren también es en el rango de 20-300 keV. Es en este rango energético donde tiene mayor sentido las calibraciones dependientes de la edad ya que se puede hacer una cuantificación de la actividad más ajustada a la realidad, sin embargo, a medida que se aumenta la energía las eficiencias se van asemejando y por tanto los parámetros geométricos van perdiendo importancia.

Edad(años)

Curva de eficiencia

Picos considerados

1

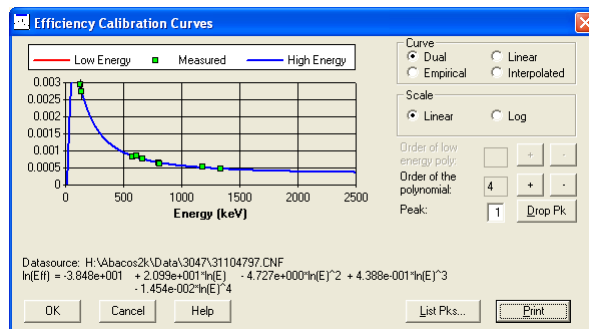


Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
1	122.06	0.00397	0.00396	2.32	0.03
2	391.69	0.00144	0.00149	18.27	-3.15
3	569.23	0.00103	0.00104	6.02	-0.57
4	569.32	0.00102	0.00105	4.09	-2.80

Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
5	604.70	0.00097	0.00096	2.94	0.46
6	661.65	0.00089	0.00089	2.46	0.56
7	795.84	0.00076	0.00075	2.44	1.34
8	1173.22	0.00056	0.00059	3.31	-5.04

Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
6	661.65	0.00089	0.00089	2.46	0.56
7	795.84	0.00076	0.00075	2.44	1.34
8	1173.22	0.00056	0.00059	3.31	-5.04
9	1332.49	0.00051	0.00050	3.30	3.24

5

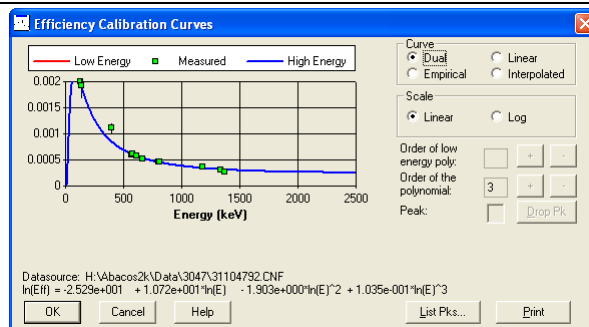


Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
1	122.06	0.00397	0.00394	9.42	-0.60
2	136.48	0.00276	0.00273	9.42	1.00
3	569.23	0.00084	0.00080	3.76	4.56
4	604.70	0.00080	0.00083	3.04	-4.46

Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
5	661.65	0.00074	0.00074	4.22	0.31
6	795.84	0.00064	0.00063	2.87	0.80
7	801.93	0.00063	0.00061	4.74	3.54
8	1173.22	0.00049	0.00051	4.36	-3.96

Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
6	795.84	0.00064	0.00063	2.87	0.80
7	801.93	0.00063	0.00061	4.74	3.54
8	1173.22	0.00049	0.00051	4.36	-3.96
9	1332.49	0.00045	0.00044	4.32	2.14

10



Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
1	122.06	0.00200	0.00199	2.78	0.16
2	136.48	0.00190	0.00191	12.27	-0.46
3	391.69	0.00085	0.00110	9.78	-22.57
4	569.23	0.00061	0.00058	4.05	4.61

Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
5	569.32	0.00060	0.00061	2.96	-1.82
6	604.70	0.00057	0.00056	2.32	1.29
7	661.65	0.00052	0.00051	2.20	1.64
8	795.84	0.00044	0.00045	2.18	-0.24

Pk/Index	XValue (keV)	Calculated P/T Ratio	Measured P/T Ratio	Measured Error (%)	Deviation (%)
9	801.93	0.00044	0.00045	3.89	-1.39
10	1173.22	0.00033	0.00035	2.52	-4.50
11	1332.49	0.00031	0.00030	2.47	2.19
12	1365.15	0.00030	0.00026	9.13	16.14

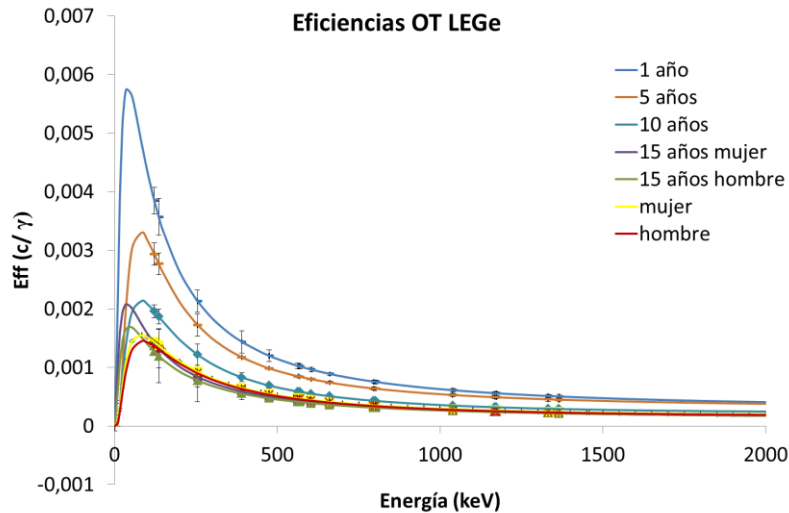


Figura 4.7: Eficiencias de cuerpo entero en el rango energético 10-2000 keV en el sistema LEGe

4.5.1.3. Validación de la calibración cuerpo entero en el sistema LEGe

Las calibraciones se validaron con medidas del maniquí BOMAB HE2 (diferente al maniquí de calibración) en cada una de las configuraciones dependiendo del tamaño/edad del individuo que simulan, según se explica en el apartado 2.4.4. Los radionucleidos del maniquí BOMAB HE2, sus emisiones energéticas e intensidades de emisión se pueden ver en la Tabla 4.5, y las actividades en todas las configuraciones están en la Tabla 4.9.

Los maniqués representantes de los grupos de edad de posible población expuesta en un accidente nuclear, se midieron y los resultados fueron analizados con sus respectivas calibraciones en eficiencia (dependientes de la edad) en geometría de contaje de cuerpo entero, obteniendo las actividades que se muestran en la Tabla 4.12. Las incertidumbres y exactitudes de las actividades de las fuentes de ^{57}Co , ^{137}Cs y ^{60}Co están calculadas según se explica en el capítulo 2. Las actividades medidas y las actividades de referencia y la exactitud en cada configuración se representan gráficamente con respecto a la edad en la Figura 4.8. La actividad de ^{57}Co es muy baja, cercana al límite de detección, en una zona del espectro ($E= 122 \text{ keV}$) de alto fondo. Esto aplica a todos los maniqués, y hace que la diferencia entre el valor medido y la actividad de referencia (exactitud) sea mayor para el ^{57}Co , siendo máxima en la configuración del niño de un año (promedio de las 5 medidas: 23%). A pesar de ser un resultado que *a priori* parece elevado, cumple los criterios de validación de la norma ISO 28218[59]: la exactitud de las actividades deben estar en el rango $[-0.25, 0.5]$, y la precisión $[<0.4]$. La exactitud y precisión de las actividades de los radionucleidos ^{57}Co , ^{137}Cs y ^{60}Co están comprendidas respectivamente entre $-0.09-0.23$, y entre $0.005-0.22$; fueron calculadas a través de las ecuaciones 2.5 y 2.7.

Tabla 4.12: Resultados de actividad del maniquí BOMAB HE2 de cuerpo entero para las diferentes configuraciones dependiendo de la edad, analizados con la eficiencia correspondiente del sistema LGe.

Espectro	⁵⁷ Co				⁶⁰ Co				¹³⁷ Cs			
	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	Amed (Bq)	ΔA (%)	Bri
1 año												
31104832	96	102	50.7	0.0643	2457	2477	5.2	0.0079	3937	3907	4.8	-0.0076
31104833	96	130	42.0	0.3493	2457	2238	5.0	-0.0892	3937	4004	4.8	0.0170
31104835	96	141	45.3	0.4615	2457	2505	5.1	0.0194	3937	4038	4.7	0.0255
31104836	96	111	36.9	0.1569	2457	2441	5.3	-0.0068	3937	3802	4.9	-0.0343
31104837	96	105	39.2	0.0963	2457	2468	5.2	0.0042	3937	4087	4.8	0.0379
			Br	0.2257			Br	-0.0129			Br	0.0077
			SBr	0.1721			SBr	0.0437			SBr	0.0288
5 años												
31104806	203	203	24.8	-0.0017	4713	4737	5.2	0.0052	6343	7682	4.5	0.2111
31104807	203	182	23.5	-0.1050	4713	4773	5.2	0.0128	6343	7636	4.2	0.2038
			Br	-0.0534			Br	0.0090			Br	0.2075
			SBr	0.0730			SBr	0.0054			SBr	0.0051
10 años												
31104803	368	369	24.2	0.0023	8535	8462	3.3	-0.0086	13498	12633	3.2	-0.0641
31104805	368	400	30.9	0.0854	8535	8996	3.4	0.0540	13498	12702	3.2	-0.0589
31104816	366	320	42.0	-0.1277	8529	8644	3.3	0.0135	13497	12923	3.2	-0.0425
31104817	366	359	34.9	-0.0198	8529	8488	3.4	-0.0048	13497	13243	3.2	-0.0188
31104840	328	267	34.1	-0.1877	8397	6844	4.3	-0.1850	13460	13320	3.7	-0.0104
			Br	-0.0495			Br	-0.0262			Br	-0.0390
			SBr	0.1084			SBr	0.0922			SBr	0.0238
H* 15 años												
31104845	586	751	36.9	0.2820	15122	14964	3.5	-0.0104	24266	23680	3.5	-0.0242
31104846	586	405	41.4	-0.3086	15122	12859	3.3	-0.1496	24266	24059	3.6	-0.0085
31104848	586	512	38.9	-0.1260	15122	13796	3.2	-0.0877	24266	23760	3.6	-0.0209
31104850	586	663	35.0	0.1318	15122	12995	3.5	-0.1407	24266	22854	3.4	-0.0582
31104851	586	593	33.4	0.0121	15122	14829	3.5	-0.0194	24266	23348	3.5	-0.0378
			Br	-0.0017			Br	-0.0816			Br	-0.0299
			SBr	0.2281			SBr	0.0654			SBr	0.0189
M* 15 años												
31104875	551	546	32.5	-0.0103	14327	14524	3.9	0.0137	23012	22580	3.4	-0.0188
31104869	551	506	63.4	-0.0823	14327	14607	3.9	0.0195	24763	22904	3.4	-0.0751
31104870	551	535	35.8	-0.0297	14327	14803	3.9	0.0332	24763	22395	3.5	-0.0956
31104872	551	597	44.4	0.0818	14327	14757	3.8	0.0300	24763	22295	3.6	-0.0997
31104874	551	571	33.9	0.0355	14327	14619	3.8	0.0204	24763	22646	3.4	-0.0855
			Br	-0.0010			Br	0.0233			Br	-0.0749
			SBr	0.0627			SBr	0.0080			SBr	0.0328
M*												
31104854	596	631	37.8	0.0584	17457	16008	3.4	-0.0830	24763	24530	3.3	-0.0094
31104855	596	622	37.6	0.0431	17457	15619	3.4	-0.1053	24763	24296	3.2	-0.0189
31104856	596	485	33.0	-0.1861	17457	16104	3.4	-0.0775	24763	24257	3.2	-0.0204
31104857	596	687	36.3	0.1521	17457	15917	3.4	-0.0882	24763	24679	3.2	-0.0034
31104859	596	723	30.6	0.2130	17457	16096	3.3	-0.0779	24763	24568	3.2	-0.0079
			Br	0.0561			Br	-0.0864			Br	-0.0120
			SBr	0.1522			SBr	0.0114			SBr	0.0074
H*												
31104860	678	829	41.4	0.2229	17574	17841	3.3	0.0152	28218	26954	3.1	-0.0448
31104860	678	770	36.8	0.1366	17574	17806	3.3	0.0132	28218	27377	3.2	-0.0298
31104860	678	727	37.1	0.0732	17574	17653	3.3	0.0044	28218	27506	3.2	-0.0252
31104860	678	768	36.1	0.1331	17574	17867	3.3	0.0166	28218	26856	3.2	-0.0483
31104860	678	662	49.2	-0.0229	17574	17752	3.3	0.0101	28218	26689	3.1	-0.0542
			Br	0.1086			Br	0.0119			Br	-0.0405
			SBr	0.0908			SBr	0.0048			SBr	0.0124

*M mujer y H hombre

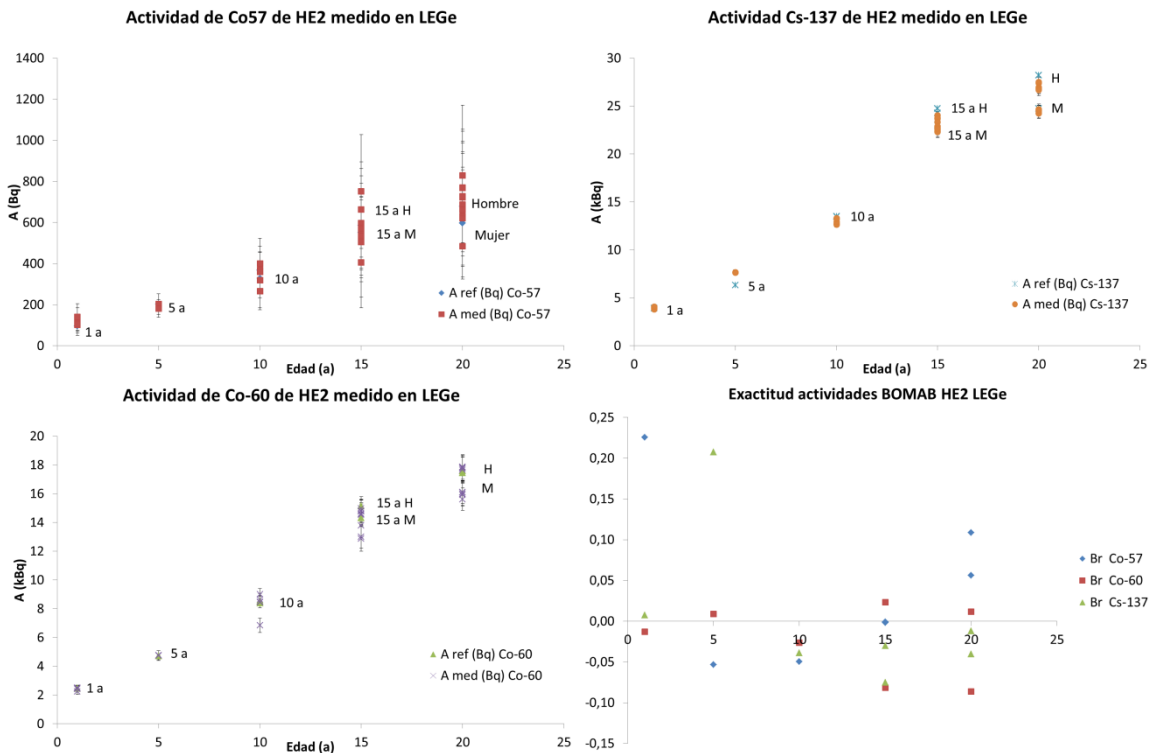


Figura 4.8: Comparación de actividades medidas, actividades de referencia y exactitud del maniquí BOMAB HE2, simulador de la contaminación interna distribuida en todo el organismo, realizadas con el sistema LE Ge

4.5.2. Estudio previo de medidas de cuerpo entero en el contador Fastscan

La calibración en eficiencia del contador Fastscan para medir emisores gamma en cuerpo entero del trabajador expuesto (hombre adulto) se realizó el 25 de julio de 2014 con el BOMAB HE2, cuyo resultado fue la curva de calibración de la ecuación 4.10.

$$Ln(Eff) = -7.287 + 1.946 \cdot Ln(E) - 3.539 \cdot 10^{-1} \cdot Ln(E)^2 + 1.766 \cdot 10^{-2} \cdot Ln(E)^3 \quad (4.10)$$

El maniquí BOMAB HE2 representa la contaminación interna de emisores gamma distribuida en todo el cuerpo del hombre adulto. Las dimensiones de las 10 piezas se especifican en la norma ANSI 13.35, como se explica en el apartado 4.3.2. El espectro resultante del maniquí BOMAB HE2 en el contador Fastscan se muestra en la Figura 4.13, donde aparecen los fotopicos del ^{57}Co , ^{137}Cs y ^{60}Co .

Se realizó un estudio con los maniqués contruidos mediante combinaciones de las 10 piezas del maniquí BOMAB HE-2, representando distintos grupos de edad de población potencialmente expuesta en caso de emergencia nuclear. Se realizaron medidas del BOMAB HE2 en las diferentes configuraciones de 1, 5, 10 y 15 años, así como de mujer adulta, que se exponen en la Tabla 4.4, posicionando las piezas seleccionadas con ayuda de diferentes soportes para situarlas con geometría de pie en el interior del

contador Fastscan, como se muestra en la Figura 4.9. La distancia de los maniquíes con respecto a los detectores fue de 9 cm.

Las actividades se calcularon a partir de las cuentas de los picos de los radionucleidos, el tiempo de medida, la eficiencia de la calibración de hombre adulto y la intensidad de emisión del radionucleido, a través de la ecuación 2.9.



Figura 4.9: Configuración de las piezas utilizadas en cada calibración del contador Fastscan.

A partir de las actividades resultantes obtenidas con las eficiencias del hombre adulto se calcularon las desviaciones de la actividad medida con respecto a la actividad de referencia (exactitud) con la ecuación 2.5. La exactitud de la actividad medida (ver Tabla 4.13) para el niño de 1 año fue de hasta un 88 % en el caso de ^{60}Co , 120 % en el ^{137}Cs y 980 % en ^{57}Co , en el caso del niño de 5 años la exactitud fue de un 31 % en el caso de ^{60}Co , 44 % en el ^{137}Cs y 424 % en ^{57}Co , para el caso del niño de 10 años la exactitud fue

de un 24 % en el ^{60}Co , 28 % en el ^{137}Cs y 270 % en ^{57}Co . A partir de los 15 años la exactitud para el ^{60}Co y el ^{137}Cs era menor de un 10 %. Para el ^{57}Co , la exactitud fue demasiado alta porque la actividad del ^{57}Co estaba muy cercana al límite de detección del contador Fastscan, además su emisión energética es 122 keV y está embebida en el pico de fondo de los detectores NaI(Tl), que es producido por las características del detector. Todas estas singularidades hicieron muy compleja la selección de la región de interés (ROI) de forma automática, por tanto se fue seleccionando manualmente la ROI que delimita el fotopico del ^{57}Co .

Tabla 4.13: Desviaciones de la familia de patrones de todo el organismo analizadas con la calibración de hombre adulto.

Edad (años)	Espectro	^{57}Co			^{137}Cs			^{60}Co		
		Aref (Bq)	Amed (Bq)	Br	Aref (Bq)	Amed (Bq)	Br	Aref (Bq)	Amed (Bq)	Br
1	91306126	100	1083	9.808	3960	8700	1.197	2482	4674	0.883
5	91306133	188	985	4.240	7441	10725	0.441	4662	6122	0.313
10	91306141	340	1258	2.699	13472	17284	0.283	8440	10477	0.241
15 M*	91306056	642	2109	2.287	23117	24884	0.076	14948	15113	0.011
15 H*	91305932	739	3064	3.146	24406	24969	0.023	15626	15542	-0.005
M*	91305929	762	3377	3.431	24913	24767	-0.006	15970	16145	0.011

*H hombre; M mujer

Los resultados permitieron valorar que sería muy conveniente calibrar el contador Fastscan en geometría de contaminación interna en todo el organismo, para obtener las eficiencias de detección para las configuraciones de 1, 5 y 10 años con el fin de determinar la actividad contaminante con valores ajustados a la realidad. El resto de configuraciones (15 años y mujer adulta) se podrían analizar con la calibración de hombre adulto, puesto que las desviaciones no son desmesuradas y por tanto las actividades medidas son bastante realistas, excepto para radionucleidos con emisiones energéticas en las bajas energías.

Por todo ello se consideró conveniente calibrar el contador Fastscan en todas las configuraciones de cuerpo entero dependiendo de la edad con el fin de mejorar el cálculo de las actividades de los radionucleidos incorporados, emisores gamma en el rango energético de 100-2000 keV.

4.5.3. Calibraciones del contador Fastscan

Los dos detectores del contador Fastscan colocados en columna, se utilizan para medir todo el cuerpo, por tanto hay que calibrarlos en energía y en eficiencia, con el fin de determinar adecuadamente los radionucleidos y las actividades retenidas.

4.5.3.1. Calibración en energía y resolución del contador Fastscan

Los canales existentes en un espectro del contador Fastscan con un rango de energías de (100-2000 keV) es de 512, por lo que cada canal tiene un rango energético promedio de 3.9 keV/canal.

Las calibraciones en energía y resolución de los picos (FWHM) del contador Fastscan se realizaron con las fuentes puntuales de ⁵⁷Co (FRC2016-455), ¹³⁷Cs (7S548) y ⁶⁰Co (MC310). Las características de las emisiones de las fuentes utilizadas están en la Tabla 4.14, sus emisiones energéticas están dentro del rango de detección (100-2000 keV) del contador Fastscan. La geometría de las fuentes puntuales fue en una posición fija en la pared a una distancia de 36 cm de los detectores y a una altura de 117 cm.

Tabla 4.14: Emisiones de las fuentes puntuales utilizadas en la calibración en energía del Fastscan

Radionucleido	T _{1/2}	E (keV)	Ie (%)	Actividad (Bq)
⁵⁷ Co (FRC2016-455)	271.4 días	122.06	85.60	5114
¹³⁷ Cs (7S548)	30.13 años	661.65	85.00	6261
⁶⁰ Co (MC310)	5.27 años	1173.24	99.90	19435
		1332.50	99.98	

Se creó, a través del software, un fichero de certificado tipo .CTF con la actividad de referencia calculada por decaimiento radiactivo de los radionucleidos que forman las fuentes radiactivas puntuales utilizadas. Este fichero, FtesPuntCoCsCo_09-10-2017.CTF (ver Figura 4.10) se utilizó en la calibración en energía para relacionar las emisiones energéticas con los canales espectrales.

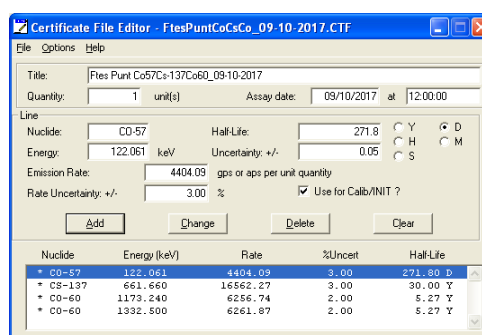


Figura 4.10.- Certificado de calibración de las fuentes puntuales en el editor del software Genie 2000

Cada resultado de una medida consiste en tres espectros como los que se muestran en la Figura 4.11, uno del detector superior, otro del detector inferior, y la suma de las señales de ambos detectores, generado por el software Abacos2000. Cada uno de ellos de forma individual y el espectro suma se calibraron en energía identificando los fotopicos correspondientes a las energías de emisión gamma de los radionucleidos presentes en el maniquí: ⁵⁷Co (122.06 keV), ¹³⁷Cs (661.65 keV), ⁶⁰Co (1173.24 keV y 1332.50 keV).

Las calibraciones en energía y FWHM se realizaron seleccionando pico por pico del espectro y puesto que los radionucleidos eran conocidos, se iban identificando con su energía de emisión (las indicaciones se presentan en los apartados 2.4.1 y 2.4.2).

Representando gráficamente la energía vs al canal se obtiene una serie de puntos que se pueden ajustar a una regresión lineal, relacionando así las energías con los canales del espectro. Los picos utilizados y la representación gráfica de la calibración de los detectores se pueden ver en la Figura 4.12. Para el caso de la resolución se representa el ancho de pico a mitad de altura (FWHM) frente a la energía del centroide del pico obteniendo una curva con forma exponencial.

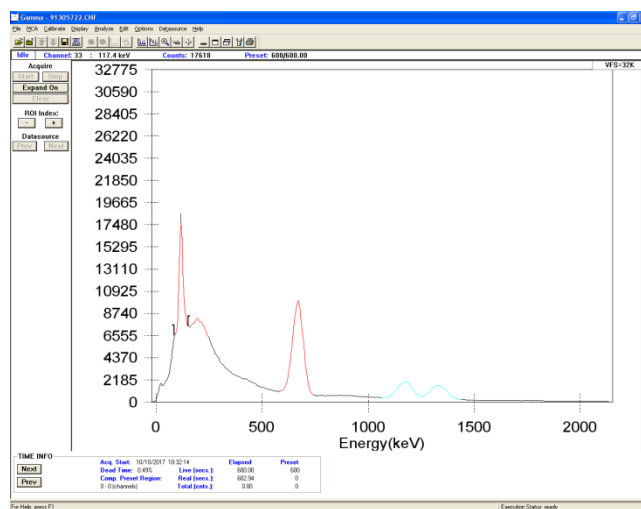


Figura 4.11: Espectro de calibración de fuentes puntuales

Las curvas de calibración en energías y resolución del pico en función del canal, obtenidas para el grupo AllSummed están dadas por la ecuación 4.11 y ecuación 4.12, respectivamente.

La calibración en energía y FWHM fue realizada el día 10/10/17 11:55:05.

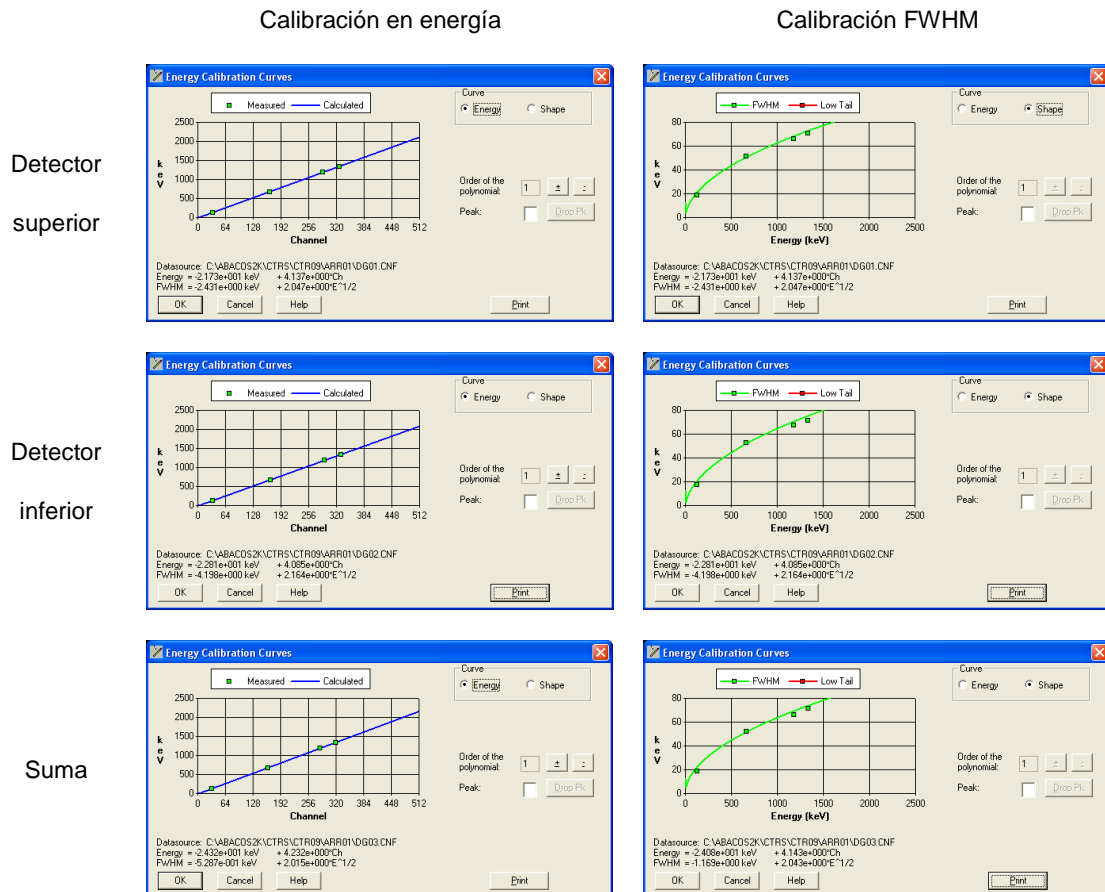


Figura 4.12: Calibraciones en energía y resolución (FWHM) de las diferentes señales del contador Fastscan.

Calibración en energía:

$$E(\text{keV}) = -24.08 + 4.143 \cdot ch \quad (4.11)$$

Calibración en resolución del pico en anchura a mitad de altura (FWHM):

$$FWHM = -1.169 + 2.043 \cdot E^{1/2} \quad (4.12)$$

En una posible contaminación real de cuerpo entero esta calibración del contador Fastscan va a permitir identificar las emisiones desconocidas que estén en el rango energético de 100-2000 keV, lo que va a facilitar la identificación de los radionucleidos contaminantes retenidos en el organismo.

4.5.3.2. Calibración en eficiencia de emisores gamma en cuerpo entero en el contador Fastscan

En el contador Fastscan las medidas son rápidas en geometría de pie. Al igual que la calibración en energía, en la calibración en eficiencia se calibraron los dos detectores del contador, así como la suma de ambas señales. Los patrones configurados de cuerpo

entero para las edades, 1, 5, 10, 15 años, adultos, se han descrito anteriormente en el apartado 4.3.2. Las piezas se fueron colocando en la configuración más parecida a una persona de pie, gracias a diferentes soportes descritos en el apartado 4.3.3 (ver Figura 4.9).

Para calibrar de cuerpo entero en el contador Fastscan se utilizaron dos patrones, el BOMAB HE2 y el BOMAB HE4. Ambos tenían ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs y ^{60}Co , además el primero tenía ^{88}Y y el segundo ^{134}Cs . El maniquí BOMAB HE4 no se utilizó debido a la proximidad de las emisiones energéticas del ^{134}Cs y ^{137}Cs , que en el espectro de los detectores NaI(Tl) se ven como picos de multiplete y hace que sea muy complejo discernir el área de los picos para poder cuantificar los factores de eficiencia en cada una de las energías. Por tanto, se utilizó el BOMAB HE2 para calcular los factores de eficiencia en las energías emisoras de todos sus radionucleidos excepto el ^{57}Co , cuya actividad era insuficiente para poder calcular correctamente el factor de eficiencia, puesto que según la norma ISO 28218[59] se recomienda un Minimum Testing Level (MTL) para el ^{57}Co de 2500 Bq, requisito que el BOMAB HE2 no cumplía. Se utilizó el maniquí BOMAB HE4 para calcular el factor de la eficiencia del fotopico de 122 keV. Por tanto, para cada calibración se necesitó hacer dos medidas, una con cada maniquí, reproduciendo en ambos casos la misma geometría.

Para proceder a la calibración en eficiencia se editaron los certificados de las fuentes de cada uno de los maniquíes BOMAB para las diferentes configuraciones, sus nombres están en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15: Certificados de las fuentes utilizadas en la calibración, maniquíes BOMAB HE2 Y HE4

Edad (años)	Certificado de fuente HE2(.CTF)	Certificado de fuente HE4(.CTF) Fastscan
Hombre	BOMAB HE2_Calib2018	OT_Hombre_BomabHe4
Mujer	BOMAB HE2_Mujer_Calib2018	OT_Mujer_BomabHe4
Niño 15	BOMAB HE2_Niño15años_Calib2018	OT_15yboy_BomabHe4
Niña 15	BOMAB HE2_Niña15años_Calib2018	OT_15ygirl_BomabHe4
10	BOMAB HE2_niño10años_Calib2018	OT_10y_BomabHe4
5	BOMAB HE2_niño5años_Calib2018	OT_5y_BomabHe4
1	BOMAB HE2_niño1año_Calib2018	OT_1y_BomabHe4

Se realizaron nuevas calibraciones para todas las configuraciones. Se colocaron los maniquíes (con las configuraciones de los niños de 1, 5, 10 y 15 años, y de mujer con las piezas indicadas en la Tabla 4.4) sobre el soporte de metacrilato, o en el taburete para el caso de 1 año, que permitía una configuración de pie colocando las piezas de la forma más parecida a un humano. En los niños de 1, 5 y 10 años además se utilizaron alzadores con las alturas de la Tabla 4.16 para que se acercaran un poco más al detector superior y mejorar así la eficiencia, ver Figura 4.9. La distancia del maniquí al detector fue 7 cm para el caso del hombre, y para el resto 9 cm.

En todos los casos, las medidas se realizaron simultáneamente con los dos detectores del contador Fastscan. Primero se midió el BOMAB HE2 y seguido el BOMAB HE4, con un tiempo de 10 minutos y se obtuvieron dos espectros como los de la Figura 4.13, cuyas referencias están recogidas en la Tabla 4.17.

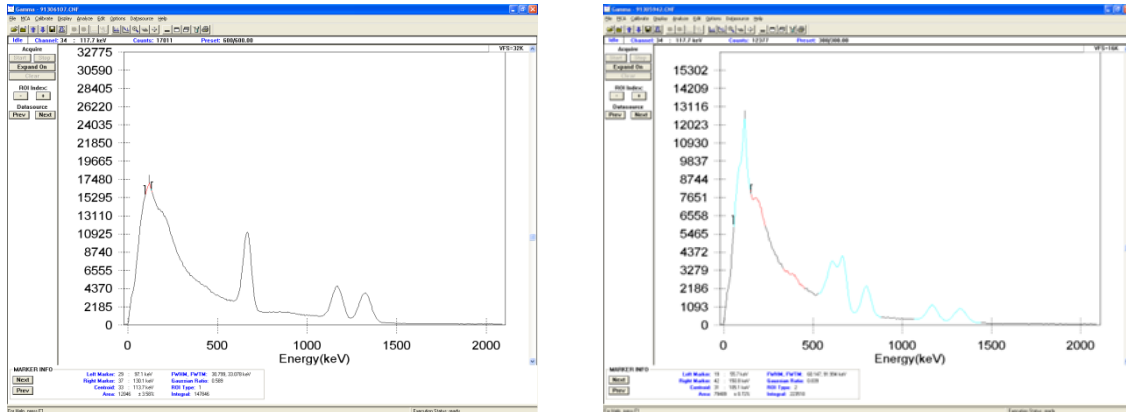


Figura 4.13: Espectros de los maniqués BOMAB HE2 y HE4 utilizados en la calibración.

Tabla 4.16: Alturas de los alzadores para algunas configuraciones.

Configuración	Altura de apoyo (cm)	Altura total (cm)
1 año	59	70
5 años	46	109
10 años	23	139
15 años M	0	159
15 años H	0	169
M	0	163
H	0	181.4

*H hombre; M mujer

Tabla 4.17: Referencia de los espectros utilizados en cada calibración

Configuración	Medida HE2	Medida HE4
1 año	91306126.CNF	91306127.CNF
5 años	91306133.CNF	91306134.CNF
10 años	91306141.CNF	91306142.CNF
Niño 15 años	91306109.CNF	91305935.CNF
Niña 15 años	91306056.CNF	91306074.CNF
Mujer	91306108.CNF	91305947.CNF
Hombre	91306107.CNF	91305942.CNF

Se fueron seleccionando y delimitando con una ROI cada uno de los picos del espectro del BOMAB HE2, excepto el pico de 122 keV del ^{57}Co , que se seleccionó del espectro del BOMAB HE4, de forma que con las cuentas delimitadas en cada pico, el tiempo de medida y la actividad se calculó el factor de calibración (ecuación 2.1) y se normalizó con su intensidad de emisión según la ecuación 2.2. Estas operaciones se realizaron a través del software Abacos 2000, que permite seleccionar los picos utilizados en la calibración y añadir eficiencias de otras energías que no son las consideradas en el primer espectro.

Calibración eficiencia niño 1 año

$$\ln(Eff) = -54.42 + 25.78 \cdot \ln(E) - 4.223 \cdot \ln(E)^2 + 0.2232 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.13)$$

Calibración eficiencia niño 5 años:

$$\ln(Eff) = -19.22 + 7.92 \cdot \ln(E) - 1.285 \cdot \ln(E)^2 + 0.06481 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.14)$$

Calibración eficiencia niño 10 años:

$$\ln(Eff) = -32.66 + 15.13 \cdot \ln(E) - 2.562 \cdot \ln(E)^2 + 0.1386 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.15)$$

Calibración eficiencia niña 15 años:

$$\ln(Eff) = -45.81 + 21.81 \cdot \ln(E) - 3.683 \cdot \ln(E)^2 + 0.2001 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.16)$$

Calibración eficiencia niño 15 años:

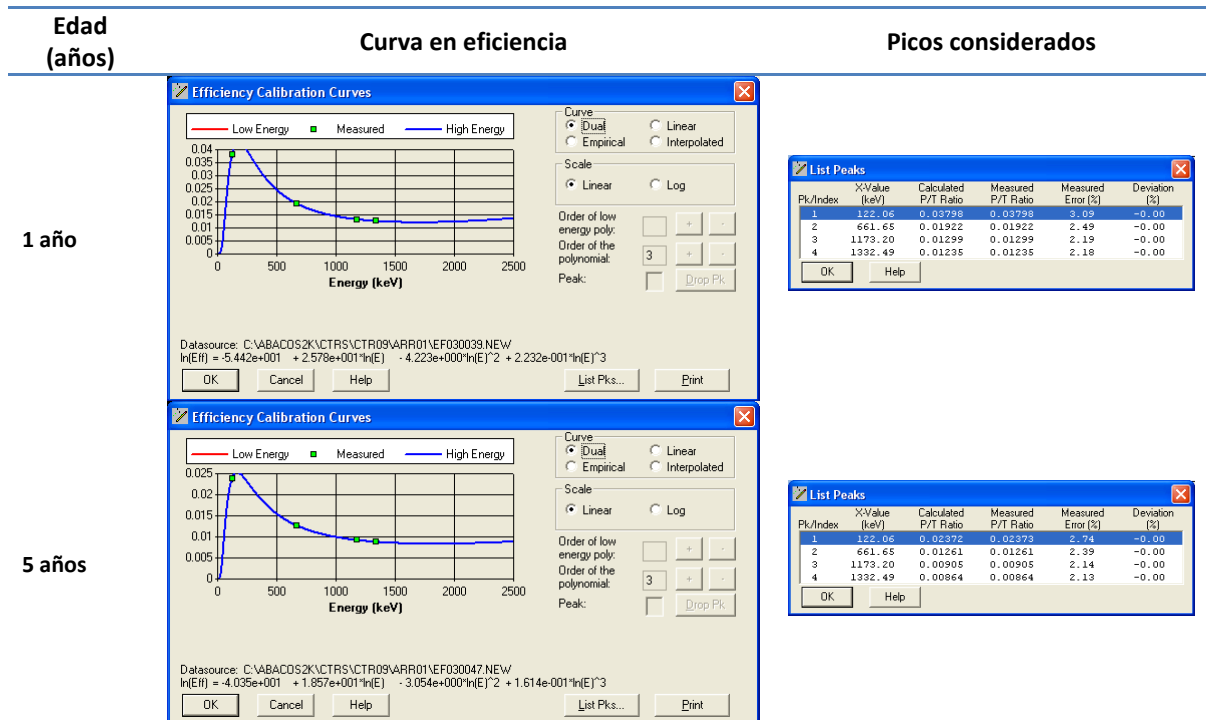
$$\ln(Eff) = -63.26 + 30.32 \cdot \ln(E) - 5.052 \cdot \ln(E)^2 + 0.2728 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.17)$$

Calibración eficiencia mujer:

$$\ln(Eff) = -83.42 + 40.9 \cdot \ln(E) - 6.866 \cdot \ln(E)^2 + 0.3749 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.18)$$

Calibración eficiencia hombre

$$\ln(Eff) = -41.31 + 19.52 \cdot \ln(E) - 3.308 \cdot \ln(E)^2 + 0.1801 \cdot \ln(E)^3 \quad (4.19)$$



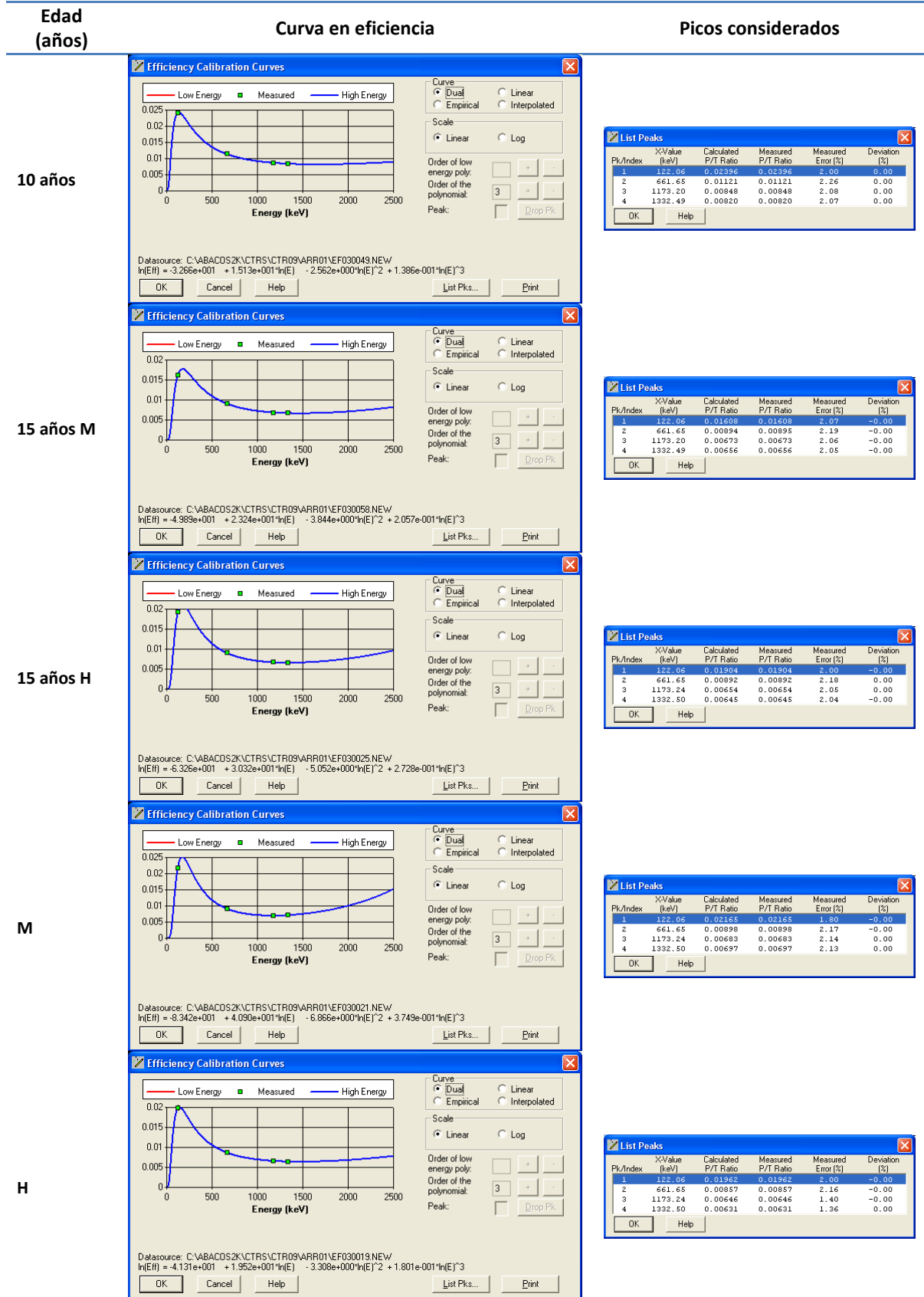


Figura 4.14: Curvas de calibración en eficiencia y picos utilizados para las diferentes configuraciones en el contador Fastscan

Representando gráficamente las eficiencias con respecto a la energía, en cada caso se obtienen diferentes picos que se ajustan a unas curvas dadas por las ecuaciones 4.13-4.19 (Figura 4.14). Estas ecuaciones son las que se van a utilizar para cuantificar las actividades de los radionucleidos contaminantes en cuerpo entero dentro del rango energético de detección.

La comparación de las curvas de eficiencia de cuerpo entero de las configuraciones de 1, 5, 10, 15 años, mujer y hombre adultos, se muestran en la Figura 4.15.

La calibración en eficiencia permite cuantificar las actividades de los radionucleidos incorporados en el organismo a través de la interpolación de la eficiencia en la energía de un pico desconocido.

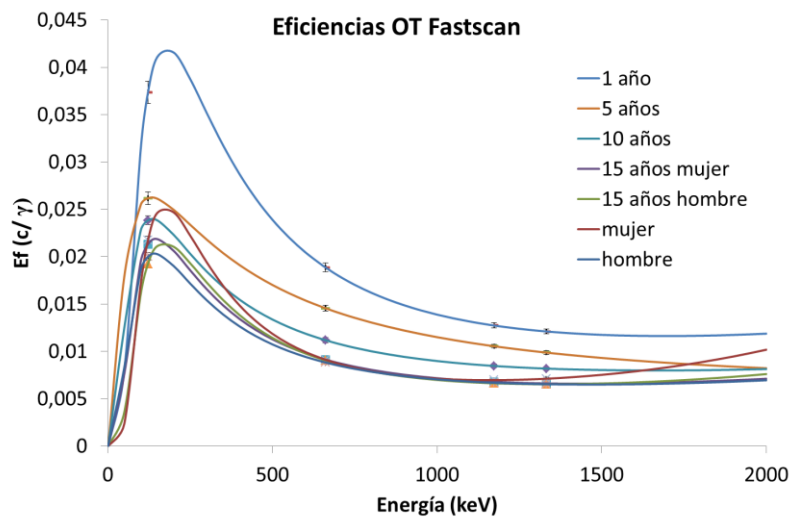


Figura 4.15: Curvas de las calibraciones en eficiencia de las diferentes configuraciones en geometría de todo el organismo en el contador Fastscan.

4.5.3.3. Validación de la calibración de cuerpo entero en Fastscan

Las validaciones de las calibraciones se realizaron con el maniquí BOMAB HE4 reproduciendo cada geometría de calibración. Las medidas se adquirieron y analizaron a través del software. Para ello existe una herramienta que permite editar e incluir librerías con el fin de identificar los picos y calcular la actividad de forma automatizada, en este caso la librería utilizada se muestra en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Librería BOMAB_HE4_2016.NLB se muestran los radionucleidos del BOMAB HE4, su vida media y emisiones principales.

Radionucleido	Vida media (d)	Energía (keV)	Ie(%)
⁵⁷ Co	271.8	122.1	85.6
⁶⁰ Co	1925	1173.2	99.8
		1332.5	99.9
¹¹³ Sn	115.1	391.69	64.9
¹³⁴ Cs	753.1	604.70	93.7
		795.85	99.2
¹³⁷ Cs	10960	661.65	85.12

Los valores resultantes de las actividades, así como las actividades de referencia de cada una de las configuraciones se muestran en las tablas 4.19-4.25. La exactitud (ver Figura 4.16) y precisión se calcularon a partir de las ecuaciones 2.5 y 2.7, como se explica en la norma ISO 28218. Las actividades del ¹¹³Sn eran tan pequeñas que no se consideraron. En el caso del niño de 1 año, la actividad del ⁵⁷Co se tuvo que analizar seleccionando la región de interés específica en la emisión de 122 keV puesto que la actividad era muy baja, y la ROI automática que seleccionaba el software era demasiado grande para el fopico. Para el resto de radionucleidos, la exactitud es menor de 0.14 y la precisión menor de un 0.06.

En el caso del niño de 5 años, las exactitudes de las actividades de los radionucleidos están entre -0.09 y -0.05, y la precisión es menor de un 3 %. La exactitud de las actividades de los radionucleidos del niño de 10 años, están entre -0.15 y -0.05, la precisión es menor de 0.06. La exactitud de la mujer de 15 años está entre -0.06 y -0.03, y la precisión es menor de 0.16. La exactitud del hombre de 15 años está en el rango de 0.001 y 0.03, y la precisión menor de 0.14. La exactitud de la mujer está entre -0.04 y 0.12, y la precisión menor de 0.05. La exactitud del hombre está entre 0.003 y 0.13 y la precisión menor de 0.05.

Conforme a lo establecido en la norma ISO 28218, los valores de la exactitud obtenidos se encuentran entre [-0.25, 0.50] y la precisión es <0.40, por tanto, todas ellas quedan validadas.

Tabla 4.19: Medidas de validación de la calibración de 1 año, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218

1 año	Co-57				Co-60				Cs-134				Cs-137			
Espectro	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri
91306162	710.1	596.0	12.09	-0.1607	1099.4	977.2	4.7	-0.1112	1557.1	1517.4	5.4	-0.0255	2642.2	2109.4	5.7	-0.2017
91306163	710.1	524.3	12.92	-0.2617	1099.4	992.8	4.67	-0.0970	1557.1	1407.9	5.6	-0.0958	2642.2	2412.1	6.0	-0.0871
91306164	710.1	523.4	11.79	-0.2628	1099.4	938.2	4.85	-0.1467	1557.1	1399.9	5.7	-0.1010	2642.2	2416.1	5.9	-0.0856
91306165	710.1	564.1	12	-0.2056	1099.4	930.4	4.85	-0.1537	1557.1	1499.8	5.4	-0.0368	2642.2	2490.4	5.9	-0.0574
91306166	710.1	595.0	19.47	-0.1620	1099.4	921.2	4.88	-0.1622	1557.1	1486.9	5.6	-0.0451	2642.2	2459.4	5.9	-0.0692
			Br	-0.2106			Br	-0.1342			Br	-0.0608			Br	-0.1002
			SBr	0.0505			SBr	0.0284			SBr	0.0350			SBr	0.0580

Tabla 4.20: Medidas de validación de la calibración de 5 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218

5 años	Co-57				Co-60				Cs-134				Cs-137			
Espectro	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)
91306135	1371.70	1416	10.08	-0.0823	2092	2020.3	3.91	-0.0499	2974	2822	5.09	-0.0905	5015	4714	5.3	-0.0627
91306136	1371.70	1457	8.94	-0.0553	2092	1996.4	3.92	-0.0612	2974	2843	5.09	-0.0836	5015	4665	5.31	-0.0724
91306137	1371.70	1360	10.23	-0.1182	2092	2062.6	3.89	-0.0300	2974	2921	5.07	-0.0585	5015	4724	5.07	-0.0606
91306138	1371.70	1452	8.86	-0.0587	2092	1979.4	3.93	-0.0692	2974	2892	5.08	-0.0677	5015	4790	5.29	-0.0475
91306139	1371.70	1370	10.47	-0.1119	2092	2015.9	3.92	-0.0520	2974	2912	5.07	-0.0613	5015	4835	5.26	-0.0387
			Br	-0.0853			Br	-0.0525			Br	-0.0723			Br	-0.0564
			SBr	0.0292			SBr	0.0147			SBr	0.0141			SBr	0.0133

Tabla 4.21: Medidas de validación de la calibración de 10 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218

Medida de emisores gamma en cuerpo entero del público expuesto en emergencia radiológica y nuclear

10 años	Co-57				Co-60				Cs-134				Cs-137			
Espectro	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)
91306143	2521	2004	9.1	-0.2052	3844	3527.4	3.47	-0.0823	5465	5021	4.75	-0.08125	9216	8314	4.85	-0.0979
91306144	2521	2003	9.34	-0.2056	3844	3516.8	3.47	-0.0851	5465	5117	4.72	-0.06362	9216	8352	4.84	-0.0938
91306145	2521	2573	7.94	0.0206	3844	3608.6	3.45	-0.0612	5465	5296	4.72	-0.03091	9216	8630	4.83	-0.0636
91306146	2521	2020	8.2	-0.1987	3844	3454.4	3.4	-0.1013	5465	5128	4.73	-0.06166	9216	8497	4.84	-0.0781
91306147	2521	2122	8.66	-0.1583	3844	3443.3	3.4	-0.1042	5465	5176	4.72	-0.0529	9216	8395	4.83	-0.0891
			Br	-0.1494			Br	-0.0868			Br	-0.0581			Br	-0.0845
			SBr	0.0971			SBr	0.0173			SBr	0.0183			SBr	0.0138

Tabla 4.22: Medidas de validación de la calibración de mujer de 15 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218

Mujer 15 años	Co-57				Co-60				Cs-134				Cs-137			
Espectro	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)
91306074	4657	4744	8.77	0.0188	6619	6378	2.9	-0.0364	9581	9203	4.27	-0.0394	15719	14833	4.25	-0.0564
91306076	4657	4819	9	0.0348	6619	6418.6	3.18	-0.0302	9581	9316	4.46	-0.0276	15719	15125	4.46	-0.0378
91306077	4657	4712	9.17	0.0119	6619	6441.8	3.17	-0.0267	9581	9375	4.46	-0.0215	15719	15206	4.47	-0.0326
91306078	4657	3354	9.24	-0.2798	6619	6320.6	3.19	-0.0451	9581	9207	4.45	-0.0390	15719	14903	4.48	-0.0519
91306079	4657	4789	8.49	0.0283	6619	6394	3.18	-0.0340	9581	9252	4.46	-0.0343	15719	14935	4.48	-0.0499
			Br	-0.0512			Br	-0.0340			Br	-0.0306			Br	-0.0431
			SBr	0.1527			SBr	0.0079			SBr	0.0076			SBr	0.0093

Tabla 4.23: Medidas de validación de la calibración de hombre de 15 años, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218

Medida de emisores gamma en cuerpo entero del público expuesto en emergencia radiológica y nuclear

Hombre 15 años		Co-57				Co-60				Cs-134				Cs-137			
Espectro	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	
91305965	5253	5549	7.73	0.0563	7068	7198	3.22	0.0183	10375	10195	4.42	-0.0174	16662	16250	4.47	-0.0247	
91305966	5253	5548	8.13	0.0561	7068	7237	3.22	0.0239	10375	10412	4.42	0.0036	16662	16090	4.48	-0.0344	
91305967	5253	4344	3.23	-0.1731	7068	7122	3.23	0.0076	10375	10486	4.41	0.0107	16662	16418	4.47	-0.0147	
91305968	5253	5827	8.86	0.1092	7068	7123	3.23	0.0078	10375	10497	4.42	0.0117	16662	16443	4.47	-0.0132	
91305969	5253	4389	8.29	-0.1645	7068	7021	3.24	-0.0066	10375	10337	4.42	-0.0037	16662	16442	4.47	-0.0132	
				Br	-0.0232			Br	0.0102			Br	0.0010			Br	-0.0200
				SBr	0.1347			SBr	0.0117			SBr	0.0120			SBr	0.0094

Tabla 4.24: Medidas de validación de la calibración de mujer, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218

Mujer		Co-57				Co-60				Cs-134				Cs-137			
Espectro	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	
91305947	5371.6	6172	11.96	0.1490	7196	6977	4.41	-0.0304	10574.6	11763	6.41	0.1124	16954	18750	6.37	0.1059	
91305948	5371.6	5707	12.72	0.0624	7196	6964	4.49	-0.0323	10574.6	11917	6.41	0.1269	16954	18846	6.36	0.1116	
91305949	5371.6	5796	12.46	0.0790	7196	6983	4.4	-0.0296	10574.6	11756	6.41	0.1117	16954	18646	6.37	0.0998	
91305950	5371.6	6331	11.74	0.1786	7196	6890	4.41	-0.0425	10574.6	11685	6.42	0.1050	16954	18749	6.37	0.1059	
91305951	5371.6	6001	12.23	0.1171	7196	6847	12.31	-0.0485	10574.6	11693	6.41	0.1058	16954	18696	6.37	0.1028	
				Br	0.1172			Br	-0.0367			Br	0.1124			Br	0.1052
				SBr	0.0481			SBr	0.0084			SBr	0.0088			SBr	0.0044

Tabla 4.25: Medidas de validación de la calibración de hombre, exactitud y precisión calculadas conforme a la ISO 28218

Hombre	Co-57				Co-60				Cs-134				Cs-137			
Espectro	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)	Bri	A ref (Bq)	A med (Bq)	ΔA (%)
91305942	6121	6919	11.64	0.1305	8207.4	8256	4.44	0.0059	12048.9	13486	6.31	0.1193	19317	21431	6.19	0.1094
91305943	6121	6217	12.73	0.0158	8207.4	8245	4.44	0.0046	12048.9	13567	6.31	0.1260	19317	21695	6.18	0.1231
91305944	6121	6519	12.47	0.0651	8207.4	8196	4.44	-0.0014	12048.9	13419	6.31	0.1137	19317	21574	6.2	0.1168
91305945	6121	6262	12.23	0.0231	8207.4	8371	4.45	0.0199	12048.9	13364	6.31	0.1091	19317	21154	6.2	0.0951
91305946	6121	6411	12.02	0.0475	8207.4	8114	4.46	-0.0114	12048.9	13844	6.3	0.1490	19317	21365	6.19	0.1060
			Br	0.0564		Br	0.0035			Br	0.1234			Br	0.1101	
			SBr	0.0458		SBr	0.0114			SBr	0.0156			SBr	0.0107	

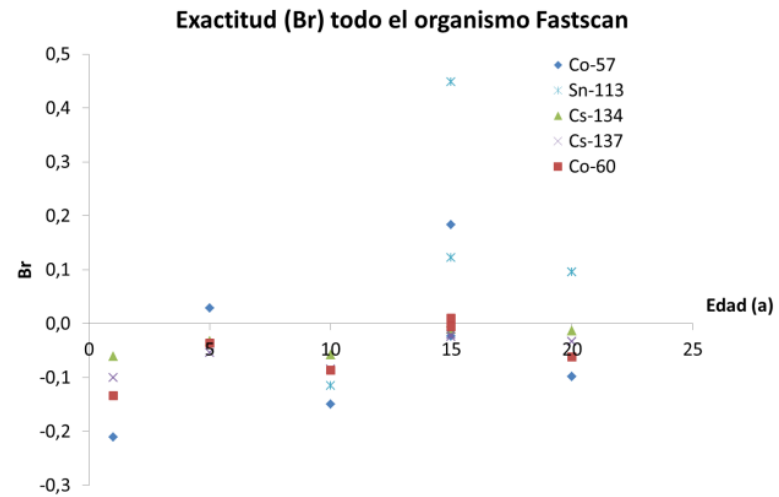


Figura 4.16: Exactitud de las medidas de validación en geometría de todo el organismo en el contador Fastscan.

4.6. Eficiencias para emisores gamma utilizados en medicina nuclear

Los radiofármacos utilizados en medicina nuclear tienen en su composición radionucleidos emisores gamma que cuando son incorporados al organismo, permiten ver su comportamiento a través de equipos TAC, PET, gammacámaras,..., con el fin de dar un tratamiento y/o diagnóstico médico al paciente. En caso de accidente, estos radiofármacos pueden llegar a incorporarse en el organismo de un trabajador expuesto (TE) o de miembros del público quedando distribuido por todo el cuerpo.

La actividad retenida en cuerpo entero se puede medir en el sistema LGe o contador Fastscan y se calcula a través de la ecuación 2.9. Para ello es necesario saber la eficiencia en la emisión energética principal de cada radionucleido en cada una de las configuraciones; dependiendo de cómo sea el tamaño de la persona habría que seleccionar la más adecuada. Las eficiencias en las principales emisiones de energías gamma de los radionucleidos de interés, se pueden interpolar de las curvas de calibración de cuerpo entero en los sistemas de detección LGe y contador Fastscan (Tabla 4.26 y Tabla 4.27). Una vez conocidas, se puede calcular la actividad.

Tabla 4.26: Eficiencias de algunos radionucleidos utilizados en medicina nuclear en sus emisiones principales e intensidades de emisión para las diferentes configuraciones de cuerpo entero en el sistema de detección LGe.

Radionucleido	E_γ (keV)	I_e (%)	Eff H**	Eff M**	Eff 15 a H**	Eff 15 a M**	Eff 10 a	Eff 5 a	Eff 1 a
Ga-68	1077.35	3.0	0.00027	0.00028	0.00025	0.00026	0.00034	0.00052	0.00060
In-111	171.28	90	0.00117	0.00122	0.00103	0.00113	0.00164	0.00238	0.00299
	245.40	94	0.00093	0.00095	0.00080	0.00087	0.00126	0.00178	0.00220
Y-90	202.51	97.3	0.00106	0.00109	0.00092	0.00100	0.00146	0.00209	0.00260
I-131	364.49	81.7	0.00067	0.00069	0.00059	0.00063	0.00089	0.00125	0.00154
	479.17	90.7	0.00053	0.00055	0.00047	0.00050	0.00069	0.00098	0.00119
Tc-99m	140.51	89	0.00129	0.00135	0.00117	0.00130	0.00184	0.00272	0.00349
Tl-201	167.43	10	0.00119	0.00123	0.00105	0.00115	0.00166	0.00242	0.00305
Ga-67	93.31	39.2	0.00144	0.00154	0.00145	0.00164	0.00211	0.00324	0.00455
	184.58	21.2	0.00112	0.00116	0.00098	0.00108	0.00156	0.00225	0.00282
Lu-177	112.95	6.4	0.00140	0.00147	0.00132	0.00148	0.00202	0.00304	0.00405
	208.37	11.0	0.00104	0.00107	0.00090	0.00098	0.00143	0.00205	0.00254
I-123	158.98	83	0.00122	0.00127	0.00109	0.00120	0.00172	0.00251	0.00317
Te-132*	228.16	88	0.00098	0.00101	0.00084	0.00092	0.00133	0.00190	0.00235

*El ^{132}Te es un radionucleido que, en caso de accidente en una central nuclear, se puede emitir al exterior junto con radionucleidos de yodo. En la cadena de semidesintegración, es el progenitor del ^{131}I , pero la diferencia es que el ^{132}Te permanece en todo el organismo.

**H hombre M mujer

Tabla 4.27: Eficiencias de algunos radionucleidos utilizados en medicina nuclear en sus emisiones principales para las diferentes configuraciones de cuerpo entero en el contador Fastscan.

Radionucleido	E _γ (keV)	Eff H**	Eff M**	Eff 15 a H**	Eff 15 a M**	Eff 10 a	Eff 5 a	Eff 1 a
Ga-68	1077.35	0.0069	0.0070	0.0068	0.0070	0.0087	0.0110	0.0133
In-111	171.28	0.0199	0.0252	0.0215	0.0215	0.0233	0.0257	0.0420
	245.40	0.0173	0.0225	0.0195	0.0188	0.0205	0.0235	0.0391
Y-90	202.51	0.0189	0.0246	0.0210	0.0205	0.0222	0.0249	0.0415
I-131	364.49	0.0135	0.0163	0.0149	0.0144	0.0164	0.0200	0.0308
	479.17	0.0111	0.0124	0.0119	0.0117	0.0138	0.0174	0.0248
Tc-99m	140.51	0.0203	0.0240	0.0207	0.0218	0.0240	0.0262	0.0402
Tl-201	167.43	0.0200	0.0252	0.0214	0.0216	0.0234	0.0258	0.0419
Ga-67	93.31	0.0179	0.0153	0.0148	0.0186	0.0222	0.0251	0.0290
	184.58	0.0195	0.0251	0.0214	0.0212	0.0229	0.0254	0.0420
Lu-177	112.95	0.0196	0.0201	0.0182	0.0208	0.0236	0.0260	0.0353
	208.37	0.0187	0.0244	0.0208	0.0203	0.0220	0.0247	0.0412
I-123	158.98	0.0202	0.0250	0.0214	0.0218	0.0237	0.0260	0.0416
Te-132*	228.16	0.0180	0.0234	0.0202	0.0195	0.0212	0.0241	0.0402

*El ¹³²Te es un radionucleido que, en caso de accidente en una central nuclear, se puede emitir al exterior junto con radionucleidos de yodo. En la cadena de semidesintegración, es el progenitor del ¹³¹I, pero la diferencia es que el ¹³²Te permanece en todo el organismo.

**H hombre M mujer

4.7. Límite de detección de emisores gamma en cuerpo entero

Los límites de detección (LD) se calcularon a partir de medidas de personas blanco o de los maniqués de fondo, dependen del tiempo de medida, y eficiencia, principalmente, cuanto mayor es el tiempo de medida, menor es el LD.

Las medidas de blancos fueron de una duración en el sistema LEGe de 30 minutos, y en el contador Fastscan de 5 minutos.

En las medidas de personas en los detectores tipo NaI(Tl) (Fastscan) se ha de restar el fondo, puesto que este tiene emisiones como la del K-40 (1460 keV), que también está en las personas y para evaluar su actividad correctamente es adecuado hacer la resta. En algunas ocasiones, dependiendo de los picos que se identifiquen en las medidas y en el fondo hay otros picos que hay que restar, tales como ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi,...., para discernir si las actividades son de fondo o de contaminación en la persona.

El cálculo de los límites de detección está especificado en el apartado 2.5 de este trabajo. Con los datos que ofrecen los canales de los picos de un espectro, la eficiencia, el tiempo de medida y a través de la ecuación 2.8 se calculan los LD. Los resultados obtenidos de radionucleidos emisores gamma (productos de activación, fisión y utilizados en medicina nuclear) en cuerpo entero para cada una de las configuraciones en el sistema LEGe se pueden ver en la Tabla 4.28 y en el sistema Fastscan en la Tabla 4.29.

Tabla 4.28: Límites de detección de algunos emisores gamma en cuerpo entero de las diferentes configuraciones en el sistema LEGe.

Límites de detección (Bq) para geometría OT en el sistema LEGe, tiempo de medida 1800 s											
	Co-57	Cs-134	Cs-137	Co-60	Ga-67	Ga-68	Y-90	Tc-99m	In-111	I-123	I-131
1 año	9.7	20.0	18.7	22.7	27.2	17.4	5.23	7.17	5.73	7.09	14.2
5 años	14.3	26.4	25.2	30.4	30.2	25.9	15.0	15.2	15.7	18.1	27.1
10 años	25.1	44.1	39.6	45.1	43.5	34.4	24.4	24.4	22.7	25.4	36.6
15 años Mujer	35.5	63.4	57.9	53.4	70.3	44.5	35.3	35.3	40.9	41.5	57.5
15 años Hombre	39.8	66.5	61.1	54.7	80.0	47.3	38.6	39.2	45.0	45.8	61.7
Mujer	35.5	60.1	54.6	50.3	75.7	41.5	32.7	34.2	38.6	39.4	52.8
Hombre	36.7	60.5	54.8	50.8	79.4	41.6	33.2	35.2	39.3	40.3	53.1

Tabla 4.29: Límites de detección de algunos emisores gamma en cuerpo entero de las diferentes configuraciones en el contador Fastscan.

Límites de detección (Bq) para geometría OT en el sistema Fastscan, tiempo de medida 300 s.											
	Co-57	Cs-134	Cs-137	Co-60	Ga-67	Ga-68	Y-90	Tc-99m	In-111	I-123	I-131
1 año	53.9	48.7	49.6	45.6	139	21.8	41.4	50.8	39.3	50.6	43.4
5 años	122	71.2	76.1	64.1	205	34.5	66.6	84.9	68.2	85.6	72.2
10 años	84.7	79.1	84.7	67.3	189	40.0	77.6	87.3	75.7	90.5	83.2
15 años Mujer	133	98.1	106	83.6	353	131	94.9	127	96.7	123	103
15 años Hombre	111	101	103	84	309	46.8	85.0	106	82.3	105	94.3
Mujer	99.5	100	105	80.9	311	45.3	73.1	92.0	71.0	89.5	85.1
Hombre	113	104	110	90.2	279	50.1	96.8	113	95.7	115	105

Se observa que el LD para las configuraciones más pequeñas es menor tanto en el contador Fastscan como en el sistema LEGe. Los límites de detección son más bajos en el detector LEGe debido principalmente al tiempo de medida es mayor (30 min), sin embargo, en el contador Fastscan (5 min) los LD son más elevados pero no implican una actividad incorporada que suponga exceder en los límites de dosis anuales para el público, que es 1 mSv/año.

Los métodos y resultados de las calibraciones de todo el organismo se han presentado como *Medida en cuerpo entero de emisores gamma incorporados por población expuesta en emergencia radiológica y nuclear*[98] en el Congreso de la SEPR de 2019 de Burgos, y *CIEMAT WBC capabilities for responding in case of nuclear and radiological emergencies*[92] en el Congreso ICDA3 de Lisboa de 2019.

4.8. Incertidumbres

Las incertidumbres de las actividades de los radionucleidos emisores gamma medidas en todo el organismo tiene en cuenta los factores que influyen en la medida[8, 66], tales como: el área neta del pico, la eficiencia del detector, la intensidad de emisión, el tiempo

de medida y la resta del fondo ambiental en el caso del contador Fastscan. Se tienen en cuenta y calculan según se explica en el apartado 2.6. En este caso las fuentes de incertidumbres más relevantes son el movimiento del sujeto durante la medida y la diferencia del tamaño de la persona con respecto al maniquí de calibración.

4.9. Conclusiones de medida de emisores gamma en cuerpo entero

Las principales conclusiones de este apartado de medida de emisores gamma en cuerpo entero del público expuesto en emergencia radiológica y nuclear se enumeran a continuación:

1. Los maniqués de todo el organismo, simuladores de las configuraciones de 1, 5, 10, 15 años y mujer cumplen las recomendaciones de la publicación ICRP 89 en cuanto a la altura y peso, ya que fueron ensamblados a partir de piezas del maniquí BOMAB de hombre adulto, cuyas dimensiones externa y métrica reproducen realmente las humanas siguiendo la norma ANSI 13.35.
2. En este trabajo de tesis, los equipos LEGe y Fastscan se calibraron en energía, resolución del pico (FWHM) y en eficiencia de cuerpo entero para permitir la identificación y cuantificación de los radionucleidos incorporados por población expuesta de diferentes edades: 1, 5, 10 y 15 años así como de la mujer adulta. Se trata de contaminantes internos emisores gamma en el rango de de energía 100-2000 keV.
3. En las energías más bajas (10-500 keV en LEGe y 100-800 keV en el Fastscan) la curva de calibración en eficiencia para emisores gamma en todo el organismo depende principalmente del volumen de la fuente y posicionamiento detector-fuente. Sin embargo, a medida que se va aumentado la energía (decir rango: $E > 500$ keV) las diferencias de geometría tienen menos impacto en la eficiencia de detección.
4. En los detectores LEGe y el contador Fastscan, las eficiencias de emisores gamma para la medida todo el organismo de las configuraciones de adultos y de 15 años son muy parecidas, y difieren más en los casos de 5 años y de 1 año.
5. Se han calculado los límites de detección de algunos radionucleidos productos de fisión, activación y utilizados en medicina nuclear. En todos los casos los LD son menores para las configuraciones más pequeñas, para las configuraciones de 15 años y adultos son muy parecidos. Los límites de detección calculados en el contador Fastscan son mayores que en el sistema LEGe ya que el tiempo de medida del primero es de 5 minutos, mientras que en el segundo caso son 30 minutos.

6. El laboratorio del CRC del CIEMAT ha mejorado su capacidad para dar respuesta en caso de una emergencia a gran escala, en plantas nucleares y en instalaciones de medicina nuclear, con calibraciones en eficiencias para la determinación de emisores gamma distribuidos en todo el cuerpo de población contaminada. Para ello se cuenta con el contador Fastscan, con detectores tipo NaI(Tl), muy eficiente, que en 5 minutos de medida permite determinar el nivel de contaminación de los individuos medidos. En caso de contaminaciones complejas, se pueden utilizar los detectores de semiconductor tipo LGe, de mayor resolución que por tanto garantizan una identificación y cuantificación de actividad de los radionucleidos contaminantes más fiables.

Capítulo 5: Medida de plutonio en pulmón en emergencia radiológica y nuclear

5.1. Introducción

El plutonio (Pu) es un metal con número atómico $Z=94$. Tiene 15 isótopos radiactivos de masas entre 232 y 246. Se obtiene en los reactores nucleares, como resultado de varias reacciones a partir del ^{238}U . Su radiotoxicidad es muy alta. El plutonio suele encontrarse en mezclas de diferentes isótopos con diferentes proporciones isotópicas de ^{241}Pu , ^{240}Pu , ^{239}Pu y ^{238}Pu .

El ^{239}Pu tiene un periodo de semidesintegración[99] muy largo, 24100 años, es un emisor alfa y tiene varias emisiones gamma y RX en muy baja intensidad de emisión, las más intensas se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Energía e intensidades de emisión RX de ^{239}Pu [99]

	Energía (keV)	Ie (%)
RX	13.44	0.15
RX	13.62	1.50
RX	17.22	2.29
RX	20.17	0.57
γ	38.66	0.011
γ	51.60	0.027

El plutonio se utiliza junto con el uranio como combustible nuclear en reactores nucleares, y para armamento nuclear. El riesgo de exposición interna se produce en situaciones de emergencia en instalaciones nucleares, accidentes relacionados con el transporte de armas nucleares y ataques terroristas que pueden afectar a trabajadores y a la población en general.

La habitual vía de incorporación del plutonio ocurre por inhalación. Su comportamiento en los pulmones y su absorción en sangre depende principalmente de la composición química, la solubilidad de los componentes y el tamaño de las partículas del aerosol inhalado[6]. Una vez que el plutonio se absorbe en la sangre y en el sistema linfático se distribuye por todo el organismo y se retiene especialmente en hígado y el tejido óseo. En el caso de los niños[100], el depósito de plutonio en el esqueleto y en el hígado es mayor que en el caso de los adultos, puesto que existen diferencias dependiendo de la edad en la distribución de actividad en la superficie de los huesos y la proporción excretada.

Para calcular la dosis debida a la incorporación de plutonio al organismo lo habitual es llevar a cabo medidas *in vitro* de concentración de actividad en orina por espectrometría α , lo cual implica esperar alrededor de 2 semanas para la obtención de los resultados de

medida. Como el límite de detección es muy alto en la medida *in vivo* de los rayos X del ^{239}Pu en un CRC, únicamente en situaciones de emergencia, cuando el riesgo de inhalación es muy alto, es conveniente realizar medidas de plutonio en pulmón por espectrometría γ que permitan determinar de forma rápida la actividad de plutonio retenida en el organismo e identificar la población más expuesta para, que en caso necesario, se sometan al tratamiento médico adecuado.

El laboratorio del CRC-CIEMAT tiene implementado en rutina para los trabajadores expuestos las medidas de pulmón para la incorporación de americio y uranio vía inhalación. La cuantificación de plutonio no está implementada puesto que los límites de detección son tan elevados que la dosis comprometida efectiva es superior al nivel de registro en trabajadores expuestos y al límite de dosis anual para el público (1 mSv)[4, 101]. Pero tiene sentido poder medir en emergencias nucleares con el fin de discernir los posibles contaminados con niveles críticos.

5.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es la determinación de la contaminación interna de ^{239}Pu en pulmón poco después de producirse un accidente, permitiendo hacer una primera valoración de los casos más graves para identificar las personas que necesitarían tratamiento médico. Para ello es necesario calibrar el equipo de detección LEGe con un maniquí de torso con pulmones simuladores activos de ^{239}Pu y posteriormente realizar un análisis de sensibilidad del sistema calculando los límites de detección.

5.3. Materiales

5.3.1. Detectores

Los detectores utilizados para la medida de actividad de ^{239}Pu en pulmón son los cuatro detectores de semiconductor de germanio del sistema LEGe (Low Energy Germanium) con un rango de detección de 10-1000 keV (con la ganancia del amplificador en 10, ver Figura 4.1), está ubicado en el interior de una cámara de bajo fondo radiactivo, y se ha descrito en el apartado 2.3.1, de este trabajo.

5.3.2. Patrones de calibración de ^{239}Pu en pulmón

El Torso de pulmón LLNL modelo HS-550 es un maniquí antropométrico simulador de un torso de hombre adulto incluyendo el cuello y la cabeza, está diseñado por el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) y fabricado por HUMANOID SYSTEMS. El maniquí está fabricado en base al cadáver de un trabajador de USA[87, 102]. Se trata de un torso modular, en el que se incluye la cabeza, cuello, cubretiroides, pulmones,

corazón, estomago, hígado, riñones, páncreas, bazo y nódulos linfáticos. Además tiene varias capas torácicas que permiten simular diferentes espesores torácicos (ET) (grosor en cm existente entre el pulmón y el exterior del torso) correspondientes a individuos delgados y gruesos (Figura 5.1). Los órganos simuladores están fabricados con varios tipos de derivados plásticos (material equivalente a tejido)[58] que simulan los diferentes tejidos blandos, además, la capa torácica básica *core* simula el tejido muscular y el hueso de las costillas y esternón. Las capas torácicas suplementarias (tipo B) de composición 50 % de tejido adiposo y 50 % de tejido muscular se superponen a la capa *core*. Los maniquíes-pulmón simuladores de los pulmones contaminados de un hombre adulto están fabricados de una espuma de poliuretano con carbonato cálcico cuya densidad y atenuación son muy parecidas a las reales en el organismo humano. Además, tiene incorporado el isótopo contaminante considerando una distribución uniforme en los pulmones simuladores. En este trabajo, se utilizó un par de pulmones de ^{239}Pu para calibrar. Las actividades de los pulmones de ^{239}Pu son de 70152 ± 2806 Bq en la fecha de adquisición 7/2/1986.



Figura 5.1: Maniquí de torso LLNL de hombre adulto.

5.4. Método de calibración de ^{239}Pu en pulmón

La determinación de la actividad de plutonio retenida en los pulmones se realiza midiendo con los cuatro detectores LEGe sobre el maniquí de torso LLNL y los pulmones de ^{239}Pu , acercándolos lo máximo posible (aproximadamente 1-2 cm). Se realiza una serie de medidas con los 5 espesores torácicos disponibles, cubriendo un rango de 1.67 a 4.27 cm, ver la Tabla 5.2. Se comienza por la capa de espesor torácico (ET) más bajo, la capa *core*, y a esta se le van añadiendo el resto de capas, aumentando progresivamente el ET, A medida que se ponen las capas con mayor espesor torácico los RX y las radiaciones γ más bajas sufren mayor atenuación.

Tabla 5.2: Capas torácicas y su espesor torácico del maniquí LLNL

Capa	Espesor torácico (cm)
Core	1.67
1B	2.57
2B	3.27
3B	3.57
4B	4.27

5.5. Resultados y discusión

Calibrar los detectores LEGe en eficiencia para la medida de plutonio en pulmón implica trabajar con rayos X y radiación γ en las energías más bajas (Tabla 5.1), donde más atenuación se produce.

5.5.1. **Calibraciones para determinar ^{239}Pu en pulmón**

Calibrar el sistema de detección LEGe (4 detectores) para la medida de ^{239}Pu en pulmón, consiste en una calibración en energías (energía en función del canal), una calibración de la resolución del pico, FWHM (anchura a media altura del pico espectral en función de la energía) y una calibración en eficiencia que relaciona la eficiencia con la energía y con el espesor torácico. El cálculo del ET[103] para hombre adulto se calcula a través de una ecuación empírica que tiene en cuenta el peso, la altura y la edad del individuo (ecuación 5.1)

$$ET(\text{cm}) = \frac{\left[\left(\frac{1.24 \cdot P(\text{kg})}{H(\text{m})^2} \right) - 0.03 \cdot E(\text{año}) - 0.8 \right]}{10} \quad (5.1)$$

5.5.1.1. Calibración en energía y resolución de anchura del pico (FWHM) del sistema LEGe

La calibración en energías y FWHM (anchura a media altura) de los detectores de semiconductor LEGe se realiza utilizando fuentes radiactivas puntuales de ^{241}Am y ^{152}Eu que emiten en el rango operativo del sistema de detección (10-1000 keV).



Figura 5.2: Geometría de calibración en Energía y FWHM

Las fuentes se ubican sobre un soporte de metacrilato en una posición fija, equidistante a los detectores $d= 15$ cm (Tabla 5.2).

La librería y el certificado de calibración de las fuentes utilizadas en la calibración de energía y FWHM están expuestos en la Tabla 5.3 y Tabla 5.4, respectivamente.

Tabla 5.3: Librería de análisis de las fuentes puntuales

Nucleido	Vida Media (a)	E (keV)	Ie (%)
¹⁵² Eu	13.6	40.10	37.70
¹⁵² Eu	13.6	121.78*	28.40
¹⁵² Eu	13.6	244.70	7.49
¹⁵² Eu	13.6	344.27	26.50
¹⁵² Eu	13.6	411.11	2.21
¹⁵² Eu	13.6	443.98	3.11
¹⁵² Eu	13.6	778.89	12.74
¹⁵² Eu	13.6	867.32	4.16
¹⁵² Eu	13.6	964.01	14.40
¹⁵² Eu	13.6	1085.78	10.00
²⁴¹ Am	433	13.90	13.20
²⁴¹ Am	433	17.70	19.50
²⁴¹ Am	433	20.90	4.80
²⁴¹ Am	433	26.40	2.40
²⁴¹ Am	433	59.54*	36.00

*líneas principales para el cálculo de actividad

Tabla 5.4: Certificado de calibración de fuentes puntuales

Nucleido	Vida Media (a)	E (keV)	γ ps	$\Delta\gamma$ ps (%)
¹⁵² Eu	13.6	40.10	9878.2	3
¹⁵² Eu	13.6	121.78*	7441.4	3
¹⁵² Eu	13.6	244.70	1962.5	3
¹⁵² Eu	13.6	344.27	6943.5	3
¹⁵² Eu	13.6	411.11	579.1	3
¹⁵² Eu	13.6	443.98	814.9	3
¹⁵² Eu	13.6	778.89	3338.1	3
¹⁵² Eu	13.6	867.32	1090.0	3
¹⁵² Eu	13.6	964.01	3773.1	3
¹⁵² Eu	13.6	1085.78	2620.2	3
²⁴¹ Am	433	13.90	5035.5	5
²⁴¹ Am	433	17.70	7438.9	5
²⁴¹ Am	433	20.90	1831.1	5
²⁴¹ Am	433	26.40	915.5	5
²⁴¹ Am	433	59.54*	13733.3	5

El certificado de calibración relaciona las energías, actividades e intensidad de emisión de las fuentes puntuales de americio y europio, y se denomina Am-Eu-Punt-2013.CTF. La librería permite identificar cada pico en el espectro (Figura 5.3) con el radionucleido de la fuente de calibración.

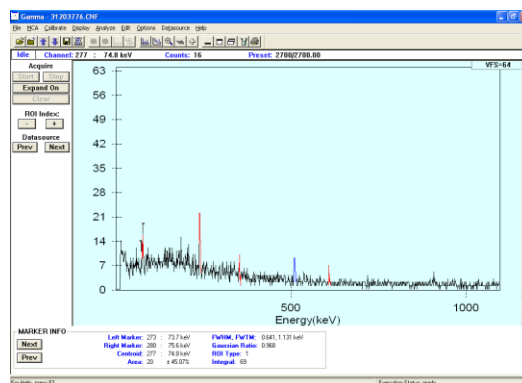


Figura 5.3: Espectro de calibración en Energía con isotopos de ²⁴¹Am y ¹⁵²Eu

La selección de los fotopicos se realiza de forma manual y los resultados de los canales y centroides de energía para los detectores se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Relación de canal- energía para cada uno de los detectores

Detector 1		Detector 2		Detector 3		Detector 4	
Canal	E (keV)	Canal	E (keV)	Canal	E (keV)	Canal	E (keV)
219.95	59.54	220.84	59.54	218.77	59.54	219.76	59.54
452.66	121.78	453.65	121.78	451.33	121.78	452.28	121.78
1284.67	344.27	1285.86	344.27	1282.74	344.27	1283.56	344.27
2910.24	778.89	2911.61	778.89	2907.13	778.89	2908.07	778.89
3603.15	964.01	3604.55	964.01	3599.55	964.01	3600.60	964.01

Los espectros All summed (4 detectores), det 1-2 y det 3-4 se consiguen a través del software que suma las señales obtenidas con los detectores individuales. La calibración en energía se realiza para cada uno de los detectores individuales y para los grupos de detectores. La calibración del grupo All Summed se muestra en la Figura 5.4.

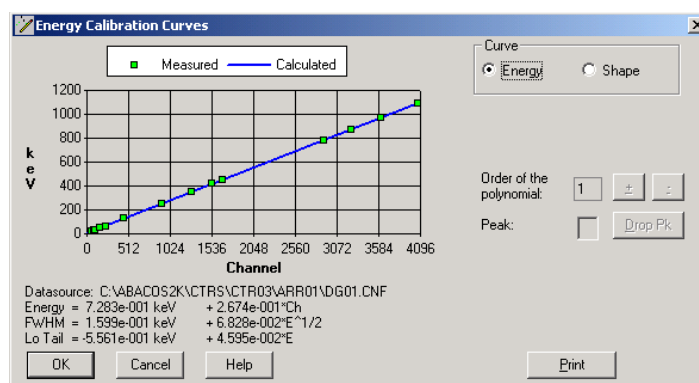


Figura 5.4: Representación de la calibración en energía para el grupo de detectores All Summed

Como resultado, se obtienen ecuaciones de energía en función del canal, y de FWHM en función de la energía (ver Tabla 5.6).

Tabla 5.6: Ecuaciones de calibración en energías y FWHM

Detector	Energía	FWHM
All Summed	$7.283 \cdot 10^{-1} \text{ keV} + 2.674 \cdot 10^{-1} \cdot \text{Ch}$	$1.599 \cdot 10^{-1} \text{ keV} + 6.828 \cdot 10^{-2} \cdot E^{1/2}$
Det 1	$7.289 \cdot 10^{-1} \text{ keV} + 2.674 \cdot 10^{-1} \cdot \text{Ch}$	$1.282 \cdot 10^{-1} \text{ keV} + 7.146 \cdot 10^{-2} \cdot E^{1/2}$

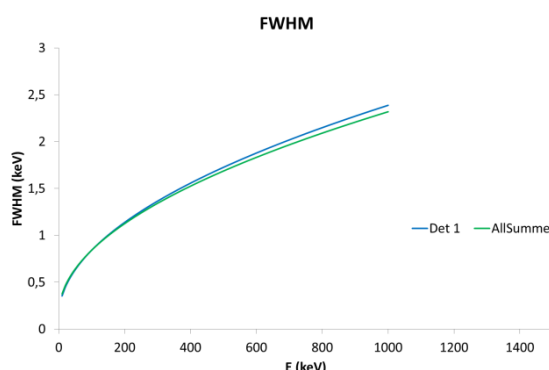


Figura 5.5: Representación de la calibración FWHM en función de la energía del sistema LEGe

Para verificar la calibración en energías y FWHM del sistema LEGe, se utiliza el maniquí de torso LLNL con pulmones de ^{241}Am y ^{152}Eu que cubren el rango operativo del sistema

(10 keV - 1000 keV). La medida de este maniquí confirma la perfecta identificación de los picos correspondiente al americio y al europio presentes en los pulmones. Además, a través de la ecuación 2.1 con el área de los picos, el tiempo de medida y la eficiencia de detección pulmonar se calcula la actividad de ^{241}Am y ^{152}Eu (Tabla 5.7).

Tabla 5.7: Validación de la calibración en energías y anchuras con los pulmones de ^{241}Am y ^{152}Eu .

All summed		^{241}Am			^{152}Eu		
Capa (cwt)	Espectro	Aref (kBq)	A (kBq)	Bri	Aref (kBq)	A (kBq)	Bri
core (1.67 cm)	31103474.CNF	42.72	45.32	0.0609	7.52	7.67	0.0199
core (1.67 cm)	31103475.CNF	42.72	45.91	0.0747	7.52	7.73	0.0279
core (1.67 cm)	31103476.CNF	42.72	45.68	0.0693	7.52	7.59	0.0093
core (1.67 cm)	31103477.CNF	42.72	45.65	0.0686	7.52	7.62	0.0133
core (1.67 cm)	31103478.CNF	42.72	45.74	0.0707	7.52	7.66	0.0186
			Br	0.0688		Br	0.0178
			SBr	0.0050		SBr	0.0071

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados de exactitud y precisión calculados. Todos cumplen los criterios de aceptación de la norma ISO 28218, [-0.25,+0.50] y <0.4, respectivamente.

Resultados de Exactitud < 2 %

Resultados de Precisión < 0.008

Por tanto queda validada la calibración en energía y FWHM. Posteriormente, se procede a realizar la calibración en eficiencia de cráneos.

5.5.1.2. Calibración en eficiencia de ^{239}Pu en pulmón de hombre

La calibración en eficiencia del sistema LEGe para medir en pulmón se realiza con el espectro suma de las cuatro señales individuales que provienen de cada uno de los detectores.

La calibración de pulmón se realiza con el maniquí de torso de hombre adulto LNLL con pulmones de ^{239}Pu . Sobre los pulmones se van añadiendo las capas torácicas con diferentes espesores torácicos (capas *core*, *1B*, *2B*, *3B* y *4B*). Debido a que los fotones emitidos en las bajas energías sufren gran atenuación y que aumenta con el espesor torácico, es necesario aumentar los tiempos de medida con el fin de obtener mayor estadística de contaje (cuentas) para el cálculo de las eficiencias. El espectro de medida de ^{239}Pu resultante tiene emisiones en bajas energías (Tabla 5.1), como se muestra en la Figura 5.6.

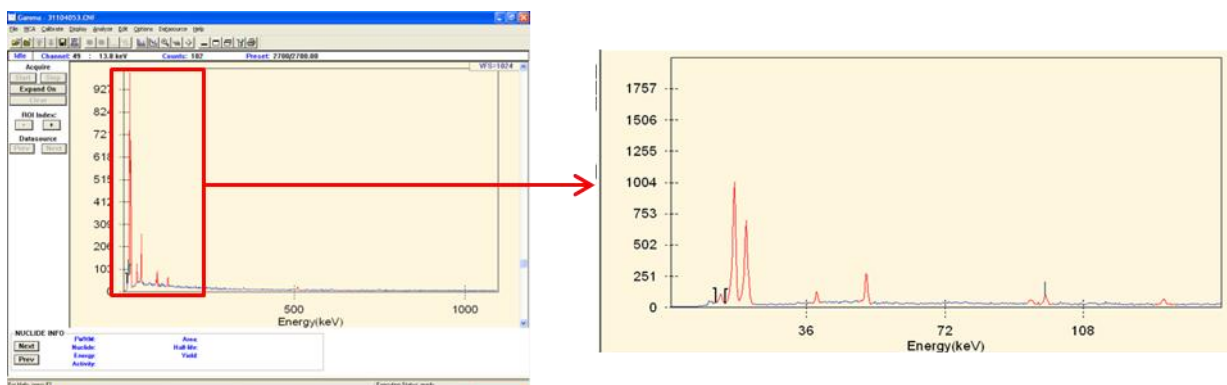


Figura 5.6: Espectro de ²³⁹Pu.

Las emisiones en las bajas energías que se observan de izquierda a derecha son: 13.6 keV con una intensidad 1.57 % pero que se muestra con muy poca intensidad debido a la baja eficiencia en esa energía. El siguiente fotopico de 17.2 keV (2.29 %) le sigue la emisión de 20.2 keV (0.57 %), a continuación se observa el fotopico de emisión γ de 38.7 keV con una intensidad de emisión de 0.0105 % y finalmente la emisión de 51.6 keV con una intensidad de emisión de 0.0271 %. Se calcula el factor de eficiencia, F_{eff} , (ecuación 2.1) en las emisiones de RX de 17.2 keV, 20.2 keV y la emisión gamma de 51.6 keV del ²³⁹Pu, por cada capa de espesor torácico. El factor de eficiencia [cps/Bq] se normaliza con su respectiva intensidad de emisión obteniendo la eficiencia, Eff [c/ γ].

Se realizaron 3 medidas de calibración con la capa *core* y 2 medidas para cada capa del resto de espesores torácicos. Los valores medios de los factores de eficiencia, F_{eff} [cps/Bq], se muestran en las tablas 5.8, 5.9 y 5.10. Normalizando los factores de eficiencia dividiéndolo entre su respectiva intensidad de emisión se obtiene la eficiencia Eff [c/ γ]. Los valores medios de las eficiencias obtenidas para cada una de las energías en cada espesor torácico se muestran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.8: Medidas y cálculos de los factores de eficiencia de pulmón ²³⁹Pu en la energía de 17.2 keV para las diferentes capa torácicas

17.2 keV	E.T. (cm)	Fichero	t (s)	Centroide (canal)	Área (cuentas)	Δ Area (cuentas)	F_{eff} (cps/Bq)	ΔF_{eff} (cps/Bq)	Eff (c/ γ)	ΔEff (c/ γ)	
CORE	1.67	31104053.cnf	2700	61.6	3529	154	1.87E-05	1.56E-06	8,14E-04	9,92E-05	
CORE	1.67	31104054.cnf	7200	61.6	9025	255	1.79E-05	1.22E-06	7,80E-04	7,76E-05	
CORE	1.67	31104065.cnf	14400	61.6	19301	369	1.91E-05	1.13E-06	8,34E-04	7,19E-05	
							CORE	1.86E-05	1.30E-06	8,09E-04	8,29E-05
1B	2.57	31104056.cnf	14400	61.6	5851	252	5.80E-06	4.82E-07	2,53E-04	3,06E-05	
1B	2.57	31104063.cnf	21600	61.6	10127	316	6.70E-06	4.77E-07	2,92E-04	3,03E-05	
							1B	1.04E-05	7.54E-07	2,72E-04	3,05E-05
2B	3.27	31104059.cnf	14400	61.6	2795	185	2.77E-06	2.94E-07	1,21E-04	1,87E-05	
2B	3.27	31104061.cnf	21600	61.6	4094	255	2.71E-06	2.77E-07	1,18E-04	1,76E-05	
							2B	5.28E-06	4.42E-07	1,19E-04	1,82E-05
3B	3.57	31104058.cnf	14400	61.6	1784	169	1.77E-06	2.39E-07	7,71E-05	1,52E-05	
3B	3.57	31104062.cnf	21600	61.6	3159	218	2.09E-06	2.28E-07	9,10E-05	1,45E-05	
							3B	3.05E-06	3.03E-07	8,41E-05	1,48E-05
4B	4.27	31104055.cnf	18000	61.6	964	154	7.65E-07	1.53E-07	3,33E-05	9,73E-06	
4B	4.27	31104060.cnf	21600	61.6	1103	57	7.29E-07	6.67E-08	3,18E-05	4,24E-06	
							4B	1.51E-06	1.74E-07	3,26E-05	6,98E-06

Tabla 5.9: Medidas y cálculos de los factores de eficiencia de pulmón ²³⁹Pu en la energía de 20.2 keV para las diferentes capa torácicas

20.3 keV	E.T. (cm)	Fichero	t(s)	Centroide (canal)	Área (cuenta)	ΔArea (cuenta)	FEff (cps/Bq)	ΔFEff (cps/Bq)	Eff (c/γ)	ΔEff (c/γ)	
CORE	1.67	31104053.cnf	2700	73.19	2582	140	1.36E-05	1.28E-06	2,39E-03	2,25E-04	
CORE	1.67	31104054.cnf	7200	73.19	6841	193	1.35E-05	9.24E-07	2,38E-03	1,62E-04	
CORE	1.67	31104065.cnf	14400	73.19	14362	322	1.42E-05	8.87E-07	2,49E-03	1,56E-04	
							CORE	1.38E-05	1.03E-06	2,42E-03	1,81E-04
1B	2.57	31104056.cnf	14400	73.19	6336	241	6.27E-06	4.90E-07	1,10E-03	8,59E-05	
1B	2.57	31104063.cnf	21600	73.19	10169	299	6.71E-06	4.66E-07	1,18E-03	8,17E-05	
							1B	6.49E-06	4.78E-07	1,14E-03	8,38E-05
2B	3.27	31104059.cnf	14400	73.19	3409	222	3.37E-06	3.55E-07	5,92E-04	6,22E-05	
2B	3.27	31104061.cnf	21600	73.19	5205	274	3.44E-06	3.18E-07	6,03E-04	5,59E-05	
							2B	3.40E-06	3.37E-07	5,97E-04	5,90E-05
3B	3.57	31104058.cnf	14400	73.19	2664	186	2.64E-06	2.90E-07	4,63E-04	5,09E-05	
3B	3.57	31104062.cnf	21600	73.19	4265	261	2.81E-06	2.85E-07	4,94E-04	5,00E-05	
							3B	2.73E-06	2.88E-07	4,78E-04	5,05E-05
4B	4.27	31104055.cnf	18000	73.19	1818	185	1.44E-06	2.04E-07	2,53E-04	3,58E-05	
4B	4.27	31104060.cnf	21600	73.19	2085	214	1.38E-06	1.96E-07	2,41E-04	3,44E-05	
							4B	1.41E-06	2.00E-07	2,47E-04	3,51E-05

Tabla 5.10: Medidas y cálculos de los factores de eficiencia de pulmón ²³⁹Pu en la energía de 51.6 keV para las diferentes capa torácicas

51.6 keV	E.T. (cm)	Fichero	t (s)	Centroide (canal)	Área (cuenta)	ΔArea (cuenta)	FEff (cps/Bq)	Δ FEff (cps/Bq)	Eff (c/γ)	ΔEff (c/γ)	
CORE	1.67	31104053.cnf	2700	190.33	694	106	1.15E-06	4.99E-07	1.35E-02	2.61E-03	
CORE	1.67	31104054.cnf	7200	190.33	2165	211	1.13E-06	3.47E-07	1.58E-02	2.18E-03	
CORE	1.67	31104065.cnf	14400	190.33	4110	331	1.36E-06	3.11E-07	1.50E-02	1.81E-03	
							CORE	1.21E-06	3.86E-07	1.48E-02	2.20E-03
1B	2.57	31104056.cnf	14400	190.33	2877	249	7.84E-07	2.17E-07	1.05E-02	1.33E-03	
1B	2.57	31104063.cnf	21600	190.33	4219	313	9.59E-07	2.39E-07	1.03E-02	1.17E-03	
							1B	8.71E-07	2.28E-07	1.04E-02	1.25E-03
2B	3.27	31104059.cnf	14400	190.33	2340	234	7.11E-07	2.69E-07	8.55E-03	1.20E-03	
2B	3.27	31104061.cnf	21600	190.33	2977	295	7.76E-07	1.94E-07	7.25E-03	1.01E-03	
							2B	7.44E-07	2.32E-07	7.90E-03	1.10E-03
3B	3.57	31104058.cnf	14400	190.33	1938	233	4.21E-07	2.08E-07	7.08E-03	1.13E-03	
3B	3.57	31104062.cnf	21600	190.33	3167	279	5.65E-07	1.72E-07	7.71E-03	9.89E-04	
							3B	4.93E-07	1.90E-07	7.40E-03	1.06E-03
4B	4.27	31104055.cnf	18000	190.33	1986	276	5.05E-07	2.16E-07	5.80E-03	1.04E-03	
4B	4.27	31104060.cnf	21600	190.33	2076	293	4.96E-07	1.69E-07	5.06E-03	9.15E-04	
							4B	5.00E-07	1.93E-07	5.43E-03	9.76E-04

Tabla 5.11: Valores de las eficiencias y sus incertidumbres para los diferentes espesores torácicos en las emisiones de RX del ²³⁹Pu

	17.22 keV 2.29 %		20.3 keV 0.57 %		51.62 keV 0.0271 %	
E.T. (cm)	Eff ((c/γ)	Δeff (c/γ)	Eff ((c/γ)	Δeff (c/γ)	Eff (c/γ)	Δeff (c/γ)
1.67	8,09E-04	8,29E-05	2,42E-03	1,81E-04	1.48E-02	2.20E-03
2.57	2,72E-04	3,05E-05	1,14E-03	8,38E-05	1.04E-02	1.25E-03
3.27	1,19E-04	1,82E-05	5,97E-04	5,90E-05	7.90E-03	1.10E-03
3.57	8,41E-05	1,48E-05	4,78E-04	5,05E-05	7.40E-03	1.06E-03
4.27	3,26E-05	6,98E-06	2,47E-04	3,51E-05	5.43E-03	9.76E-04

Representando la eficiencia en función del espesor torácico se obtiene una serie de puntos por cada energía que se pueden ajustar a una función exponencial, como se muestra en la gráfica de la Figura 5.7. En la última gráfica, está representada la comparativa de las eficiencias en función del espesor torácico en cada una de las

energías de estudio (17.2 keV, 20.2 keV y 51.6 keV). A partir de las funciones obtenidas (ecuación 5.2, ecuación 5.3 y ecuación 5.4) se puede interpolar la eficiencia para cualquier espesor torácico de cualquier individuo expuesto.

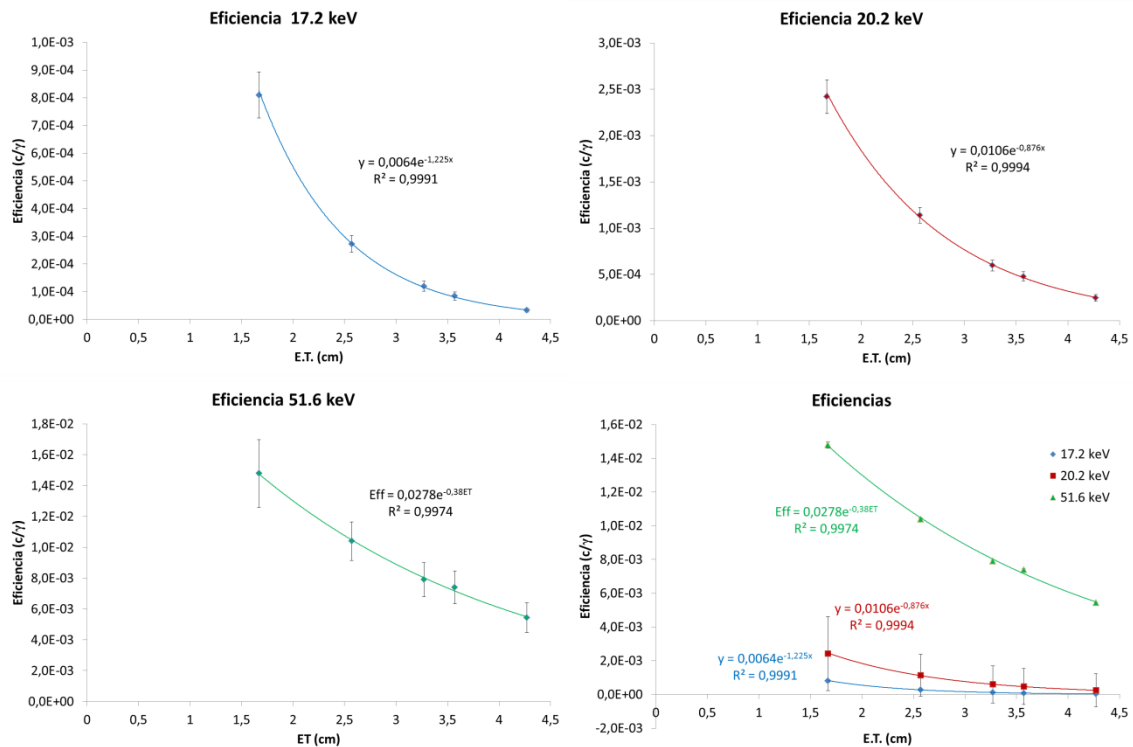


Figura 5.7: Eficiencia en función del espesor torácico para las diferentes emisiones energéticas de ^{239}Pu y su comparación

$$Eff\left(\frac{c}{y}\right) = 0.0064 \cdot e^{-1.225 \cdot ET(cm)} \text{ para energía de 17.2 keV} \quad (5.2)$$

$$Eff\left(\frac{c}{y}\right) = 0.0106 \cdot e^{-0.876 \cdot ET(cm)} \text{ para energía de 20.3 keV} \quad (5.3)$$

$$Eff\left(\frac{c}{y}\right) = 0.0278 \cdot e^{-0.38 \cdot ET(cm)} \text{ para energía de 51.6 keV} \quad (5.4)$$

Por otra parte, representando el logaritmo neperiano de la eficiencia en función del logaritmo neperiano de la energía, ver Figura 5.8, se obtienen relaciones de la eficiencia en función de la energía en el rango de 17 a 52 keV (ecuaciones 5.5-5.9), que puede ser útil para detectar los rayos X de los actínidos y las emisiones gamma de muy bajas energías.

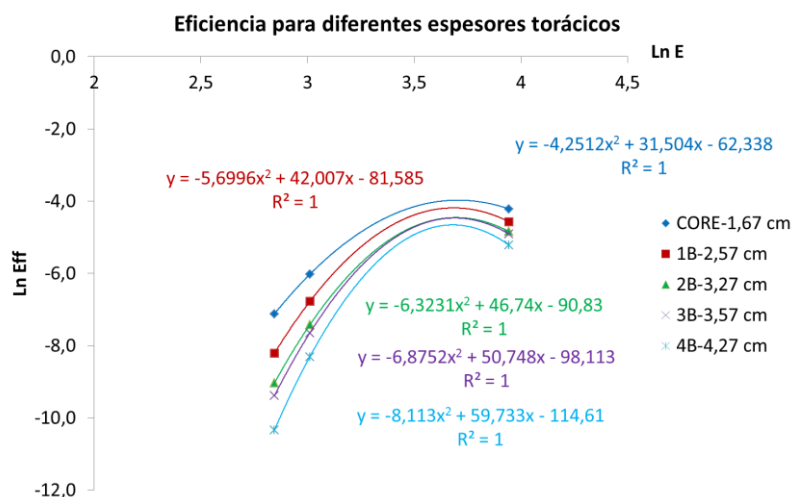


Figura 5.8: El logaritmo neperiano de las eficiencias en función del logaritmo neperiano de la energía

$$\text{LnEff} = -4.25 \cdot \text{LnE}^2 + 31.50 \cdot \text{LnE} - 62.34 \text{ capa core} \quad (5.5)$$

$$\text{LnEff} = -5.70 \cdot \text{LnE}^2 + 42.01 \cdot \text{LnE} - 81.59 \text{ capa 1B} \quad (5.6)$$

$$\text{LnEff} = -6.32 \cdot \text{LnE}^2 + 46.74 \cdot \text{LnE} - 90.83 \text{ capa 2B} \quad (5.7)$$

$$\text{LnEff} = -6.88 \cdot \text{LnE}^2 + 50.75 \cdot \text{LnE} - 98.11 \text{ capa 3B} \quad (5.8)$$

$$\text{LnEff} = -8.11 \cdot \text{LnE}^2 + 59.73 \cdot \text{LnE} - 114.61 \text{ capa 4B} \quad (5.9)$$

5.5.1.3. Validación de calibración en la determinación de ^{239}Pu en pulmón de hombre

La validación consiste en hacer medidas en la misma geometría que la de calibración y calcular la actividad con la eficiencia de calibración calculada. La validación de la calibración se realiza con el maniquí de torso del Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) (Figura 5.9), diferente del maniquí que se ha utilizado en la calibración; se trata de un maniquí torso LLNL HS-500, con los órganos móviles y dos capas torácicas correspondientes a espesores torácicos de 1.8 cm y 2.8 cm.

A partir de los ajustes de las curvas de la eficiencia en función del espesor torácico se interpolan las eficiencias para obtener los valores correspondientes de los dos espesores torácicos del maniquí IRSN de validación, en las diferentes energías del ^{239}Pu utilizando las ecuaciones 5.2, 5.3 y 5.4, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 5.12.

Las medidas de los pulmones de plutonio de IRSN se analizan con las eficiencias de cada capa de la Tabla 5.12, obteniéndose las actividades medidas de ^{239}Pu que se muestran en Tabla 5.13, Tabla 5.14 y Tabla 5.15. Se calculó la exactitud de la actividad

teniendo en cuenta que la actividad de referencia corregida por decaimiento a fecha de realización de las medidas era 45422.3 ± 176.7 Bq (09/03/2016).



Figura 5.9: Maniquí de torso del IRSN. <https://wbc.llnl.gov/content/assets/images/torso.jpg>

Tabla 5.12: Eficiencias para los espesores torácicos de 1.8 y 2.8 cm en las emisiones energéticas de 17.2 y 51.6 keV

Maniquí torso de IRSN	ET (cm)	17.2 keV	20.2 keV	51.6 keV
Placa 0	1.80	7,06E-04	2,19E-03	1,40E-02
Placa 0+1	2.80	2,07E-04	9,12E-04	9,59E-03

Tabla 5.13: Medidas de Validación de la calibración de ^{239}Pu para la energía de RX 17,2 keV en pulmón de hombre en el sistema LEGe.

E.T. (cm)	Fichero	Fecha	T (s)	Centroide (Ch)	Area (Cuenta)	Δ area (cuenta)	A (Bq)	Δ A (Bq)	Br
1.8	31104369.CNF	09-03-16	2700	61.6	1937.15	124.2	44402	8064	-0,0225
1.8	31104373.CNF	10-03-16	2700	61.6	1892.08	123.4	43369	7924	-0,0452
1.8	31104375.CNF	11-03-16	2700	61.6	1768.97	123.5	40547	7595	-0,1073
1.8	31104376.CNF	11-03-16	2700	61.6	1808.70	127.2	41458	7786	-0,0873
					PLACA 0	Promedio	42444	Br	-0,0656
							1757	SBr	0,0387
2.8	31104370.CNF	09-03-16	10800	61.6	1988.47	182.1	38789	9254	-0,1460
2.8	31104371.CNF	09-03-16	2700	61.6	564.40	88.5	44039	13378	-0,0305
2.8	31104372.CNF	10-03-16	10800	61.6	2122.81	191.3	41410	9817	-0,0883
2.8	31104374.CNF	10-03-16	10800	61.6	2280.45	175.6	44485	9963	-0,0206
2.8	31104377.CNF	11-03-16	3600	61.6	743.430	107.6	43506	12690	-0,0422
					PLACA 0+1	Promedio	42446	Br	-0,0655
							2359	SBr	0,0519

Tabla 5.14: Medidas de validación de la calibración de ^{239}Pu para la energía de RX 20,2 keV en pulmón de hombre en el sistema LEGe.

E.T. (cm)	Fichero	Fecha	T (s)	Centroide (Ch)	Area (Cuenta)	Δ area (cuenta)	A (Bq)	Δ A (Bq)	Br
1.8	31104369.CNF	09-03-16	2700	72.57	1270.73	119.3	37697	4452	-0.1701
1.8	31104373.CNF	10-03-16	2700	72.36	1318.95	141.4	39127	4969	-0.1386
1.8	31104375.CNF	11-03-16	2700	72.52	1275.95	146.6	37852	5002	-0.1667
1.8	31104376.CNF	11-03-16	2700	72.21	1225.93	144.2	36368	4872	-0.1993
					PLACA 0	Promedio	37761	Br	-0.1687
							1128	SBr	0.0248
2.8	31104370.CNF	09-03-16	10800	20.04	2098.54	186.4	37372	4518	-0.1772
2.8	31104371.CNF	09-03-16	2700	20.09	491.91	97.4	35041	6796	-0.2285
2.8	31104372.CNF	10-03-16	10800	72.48	2215.96	199.7	39463	4805	-0.1312
2.8	31104374.CNF	10-03-16	10800	20.06	2252.10	195.5	40107	4795	-0.1170
2.8	31104377.CNF	11-03-16	3600	20.05	742.010	104.5	39643	6171	-0.1272
					PLACA 0+1	Promedio	38325	Br	-0.1562
							2115	SBr	0.0466

 Tabla 5.15: Medidas de validación de la calibración de ^{239}Pu para la energía de emisión γ 51.6 keV en pulmón de hombre en el sistema LEGe.

E.T. (cm)	Fichero	Fecha	T (s)	Centroide (Ch)	Area (Cuenta)	Δ area (cuenta)	A (Bq)	Δ A (Bq)	Br
1.8	31104369.CNF	09-03-16	2700	190.33	423.34	85.6	41245	13369	-0.0920
1.8	31104373.CNF	10-03-16	2700	190.33	424.06	95.6	41315	14261	-0.0904
1.8	31104375.CNF	11-03-16	2700	190.33	539.00	130.0	52513	18871	0.1561
1.8	31104376.CNF	11-03-16	2700	190.33	420.05	116.7	40924	16063	-0.0990
					PLACA 0	Promedio	43999	Br	-0.0313
							5678	SBr	0.1250
2.8	31104370.CNF	09-03-16	10800	190.33	1138.99	225.3	40567	12029	-0.1069
2.8	31104371.CNF	09-03-16	2700	190.33	238.00	100.7	33907	16952	-0.2535
2.8	31104372.CNF	10-03-16	10800	190.33	1144.75	223.9	40772	12008	-0.1024
2.8	31104374.CNF	10-03-16	10800	190.33	1181.93	235.9	42096	12551	-0.0732
2.8	31104377.CNF	11-03-16	3600	190.33	495.420	125.3	52935	18331	0.1654
					PLACA 0+1	Promedio	42055	Br	-0.0741
							6867	SBr	0.1512

Los resultados de exactitud, Br , calculados con la ecuación 2.5, en la capa 0, para las energías de 17.2 keV, 20.2 keV y 51.6 keV son -0.04, -0.17 y -0.03 respectivamente, y para la capa 0+1 la exactitud es de -0.06, -0.16 y -0.07. La precisión, SBr , está calculada por la ecuación 2.7, en la capa 0, para las energías de 17.2 keV, 20.2 keV y 51.6 keV son 0.04, 0.03 y 0.13 respectivamente y para la capa 0+1 la precisión es de 0.052, 0.05 y 0.15. Los resultados de validación en todos los casos se cumplen los criterios de aceptación de la norma ISO 28218[59] ($-0.25 < Br < 0.5$ y $SBr < 0.4$).

5.6. Límite de Detección (LD) de ^{239}Pu en pulmón

Se calcula el LD del método de ensayo de acuerdo con la norma ISO 28218[59], según la ecuación 2.8. Se realizaron medidas blanco, no contaminada, con el maniquí de torso y

se analizaron con la eficiencia de cada espesor torácico y cada energía. Debido a la fuerte atenuación sufrida por los fotones del ^{239}Pu , a medida que aumenta el espesor torácico se debe incrementar el tiempo de contaje para obtener valores razonables que permitan tomar decisiones en emergencias.

Se calcularon los límites de detección para medidas de 1 h y para tres medidas consecutivas de 1 h, es decir 3 h, resultando los valores, que se muestran en las Tablas 5.16 y 5.17. Para espesores torácicos altos la atenuación sufrida es muy grande y los LD son muy altos; en estos casos se necesitan tiempos de medida de 3 h o más.

Tabla 5.16: Límites de detección de ^{239}Pu en pulmón con tiempo de medida 1h.

Espesor torácico (cm)	LD(Bq) 17.2 keV	LD(Bq) 20.3 keV	LD(Bq) 50.6 keV
1.67	708	872	3115
2.57	2127	1916	4384
3.27	5010	3535	5719
3.57	7234	4596	6409
4.27	17050	8484	8361

Tabla 5.17: Límites de detección de ^{239}Pu en pulmón con tiempo de medida 3h.

Espesor torácico (cm)	LD(Bq) 17.2 keV	LD(Bq) 20.3 keV	LD(Bq) 50.6 keV
1.67	238	407	1679
2.57	970	892	2362
3.27	2284	1645	3081
3.57	3298	2139	3453
4.27	7771	3946	4504

5.7. Incertidumbres

La incertidumbre de la actividad del ^{239}Pu medido en pulmón tiene en cuenta principalmente la estadística de contaje y la incertidumbre asociada a la eficiencia de detección (incertidumbre en la actividad del patrón de calibración y estadística de contaje de la medida de calibración) y se calcula según se explica en el apartado 2.6. Dentro de las incertidumbres de tipo B[66] se incluyen las más destacables son del movimiento de la persona durante el contaje (respiración) y la determinación del espesor torácico. Además, se considera que el sistema de medida de calibración en pulmón es homogéneo, pero los depósitos de la contaminación casi nunca siguen este patrón.

5.8. Conclusiones de medida de plutonio en pulmón

Las conclusiones de este capítulo de medida de plutonio en pulmón en emergencia nuclear se muestran a continuación:

1. El sistema de detección LEGe es útil en situaciones de emergencia nuclear para la medida de RX y fotones gamma de baja energía de radionucleidos incorporados al organismo vía inhalación. Los fotones del ^{239}Pu (emisiones de rayos X y radiación gamma de baja energía) sufren gran atenuación pulmonar que se ve incrementada con el aumento del espesor torácico del individuo contaminado. Las eficiencias más altas corresponden a la energía de 50.6 keV.
2. La anatomía de las personas influye mucho en la sensibilidad del método y hace que los tiempos de medida deban ser incrementados para la obtención de suficiente estadística de conteo que permita mejorar al máximo la detección y cuantificación del plutonio.
3. Las eficiencias varían en función del espesor torácico, se han obtenido las relaciones para las energías de 17.2 keV, 20.2 keV y 51,6 keV, de forma que permite calcular las eficiencias en rango de 1.67-4.27 cm de espesor torácico. De igual forma se han conseguido obtener relaciones de la eficiencia en función de la energía para el rango energético de 17.2 keV-51.6 keV.
4. Los límites de detección son demasiado altos como para considerar esta técnica en condiciones de rutina para la vigilancia de trabajadores expuestos en su lugar de trabajo, pero puede ser adecuada en situaciones de emergencia nuclear en la que se requiera tomar decisiones rápidas para tratamiento médico de decorporación a trabajadores o miembros del público que han sufrido contaminación severa con ^{239}Pu .
5. Una línea de trabajo futuro identificada es el desarrollo de maniqués de torso de mujer (muy útil en el caso de trabajadoras expuestas) y niños para realizar las calibraciones pulmonares en población expuesta vía inhalación de actínidos, dependiendo del sexo y de la edad.

Capítulo 6: Medida de americio en hueso en miembros del público en emergencia radiológica y nuclear

6.1. Introducción

El americio (Am) es un metal que no se encuentra en la naturaleza, se produce a partir de la absorción de neutrones en átomos de plutonio en el interior de los reactores nucleares. Existen diferentes isótopos del americio, y todos son radioactivos. El más habitual es el ^{241}Am , las emisiones que produce son alfa y gamma (Tabla 6.1) y tiene un periodo de desintegración de 432.2 años.

Tabla 6.1: Energía e intensidades de emisión gamma de ^{241}Am . <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/>

Energía (keV)	Ie (%)
17.7	19.5
20.9	4.8
26.4	2.4
59.5	35.9

El americio está presente en diferentes equipos y dispositivos tales como reactores nucleares, bombas nucleares de plutonio, antiguos detectores contra incendios y pararrayos. En la actualidad, el riesgo de irradiación interna se produce en trabajadores expuestos que trabajan en el desmantelamiento de las instalaciones donde se utilizaban estos equipos. En caso de un accidente nuclear la población también quedaría expuesta ya que puede producirse contaminación en el medio ambiente[104] permaneciendo suspendida en el aire y luego ser depositada en plantas y en animales durante largo tiempo. Puede pasar al organismo humano a través de la inhalación de polvo de americio suspendido en el aire o por la ingestión de agua y vegetales contaminados y de animales a través de la dieta.

La incorporación de americio en el organismo puede ser debida a una exposición interna crónica (continua) o a una incorporación aguda asociada a un incidente. Lo más habitual es la incorporación por inhalación, por lo que la contaminación permanecerá en el primer momento en los pulmones, posteriormente, en los alveolos pulmonares se produce el proceso de absorción de la contaminación hacia los líquidos extracelulares, sangre y linfa, y desde aquí se distribuye entre los órganos y tejidos, reteniéndose especialmente en el hígado y los huesos, y excretándose vía orina y heces.

El tejido óseo[56, 70] se compone de superficie ósea, volumen óseo, cavidad ósea (médula ósea) y tejido blando. La actividad de ^{241}Am que se deposita en el esqueleto se asigna inicialmente a la superficie ósea[104]; después se produce la transferencia hacia la médula ósea ("resorption"), o a volumen óseo (formación de nuevo tejido óseo). El

material que abandona las cavidades óseas entra en sangre y se redistribuye de nuevo (recirculación).

Para calcular la dosis por exposición interna debida a la incorporación de americio, se recomienda la medida *in vitro* de actividad en excretas mediante espectrometría alfa. En caso de altos niveles de contaminación interna vía inhalación el americio puede ser detectado mediante técnicas *in vivo* de medida de actividad en pulmón y posteriormente, unos meses después de la incorporación podría ser detectado mediante la medida de americio en hueso.

6.2. Objetivo

La finalidad de este trabajo es la determinación de la contaminación interna de ^{241}Am , cuando lleva incorporado en el organismo un periodo de tiempo largo, y la contaminación se ha ido depositando en el tejido óseo. Para ello es necesario calibrar el equipo de detección LEGe del Laboratorio de CRC-CIEMAT con diferentes maniqués de cráneo en diferentes edades y obtener las eficiencias de detección para la energía gamma principal de 59.5 keV y los límites de detección asociados.

A partir de las medidas *in vivo* de ^{241}Am en cráneo con espectrometría γ en distintas geometrías de contaje, se pretende determinar cuál es la geometría de cráneo más adecuada para medir el americio, desde el punto de vista de la eficiencia de detección, teniendo en cuenta las limitaciones de la instalación del sistema de detección LEGe diseñado para medidas pulmonares, y considerando una distribución homogénea del ^{241}Am en el tejido equivalente a hueso dentro del maniquí cráneo.

Para la geometría de medida seleccionada, se ha procedido a la calibración en eficiencia del equipo, lo que permitirá determinar la actividad del ^{241}Am en el cráneo de una persona contaminada por incorporación del radionucleido. Se puede calcular a continuación la actividad de ^{241}Am en todo el esqueleto, considerando la distribución homogénea de la contaminación y conociendo el porcentaje de masa de hueso del cráneo[56].

Se ha participado en una intercomparación de medidas[105-108] y simulación Monte Carlo para la determinación de americio en 3 maniqués de cráneo organizada por la plataforma europea de dosimetría EURADOS (European Radiation Dosimetry Group www.eurados.org).

6.3. Materiales

6.3.1. Detectores

El equipo de detección utilizado para la medida de actividad de ^{241}Am en hueso son los cuatro detectores de semiconductor de germanio del sistema Low Energy Germanium, LEGe, con un rango energético de detección de 10-1000 keV (con la ganancia del amplificador en 10, ver Figura 6.1), ubicados en el interior de la cámara blindada de bajo fondo radiactivo del laboratorio del CRC-CIEMAT, según esta descrito en el apartado 2.3.1.



Figura 6.1: Detectores LEGe y cadena electrónica asociada, con el amplificador en la posición 10, que permite detectar en el rango de energía de 10-1000 keV.

6.3.2. Patrones de calibración ^{241}Am en hueso

En el CRC-CIEMAT se han medido dos maniqués de cabeza, donde se ha simulado la contaminación de americio en los huesos de cráneo (ver Figura 6.2). El objetivo es comparar las propiedades de los distintos cráneos, optimizar la eficiencia de detección y ver el impacto en el tamaño en la misma. Como se ha visto en los capítulos anteriores de esta tesis, es importante disponer de calibraciones con patrones que simulen distintos grupos de población expuesta que puede verse afectada en un accidente nuclear.

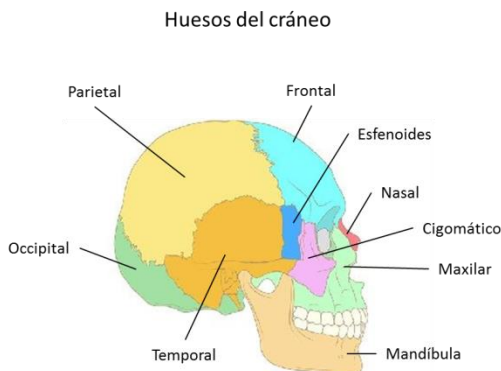


Figura 6.2: Huesos de cráneo humano

El **cráneo CIEMAT-Cohen** es un maniquí antropométrico simulador de una cabeza humana, fabricada por Dr. Cohen en New York Medical Center (Figura 6.3). El material equivalente a hueso utilizado es el yeso[58, 103], cuyo espesor es de 6 mm, que corresponde al valor medio del espesor óseo en una cabeza de raza occidental de hombre adulto. Fue construido con seis capas de vendas de yeso que se aplicaron a un molde del maniquí cabeza. La actividad de americio se aplicó en la parte exterior de la tercera capa, colocando papel de filtro con el americio depositado. Tras su secado, se añadieron otras 3 capas de yeso, por lo que el americio se encuentra en el centro del material simulador de hueso. Al secarse, se retiró el molde del interior y ese espacio fue rellenado, al igual que el exterior del yeso, con parafina equivalente en densidad, coeficiente de atenuación y Z efectiva, al material simulador del tejido blando y el cerebro. La actividad del ^{241}Am en el cráneo CIEMAT-Cohen es de 1000 ± 31 Bq en la fecha de 1-3-1997. Este maniquí fue adquirido por el CIEMAT para la calibración de sus equipos de CRC.

El perímetro craneal es de 62 cm que corresponde a una cabeza de adulto, percentil de 95 %, según las tablas de la Organización Mundial de la Salud (OMS).



Figura 6.3: Maniquí de cráneo de hombre adulto CIEMAT-Cohen.

El **Cráneo BfS** es un maniquí antropométrico simulador de una cabeza humana (Figura 6.4), fabricado por el New York Medical Center, USA, para la Oficina Federal de Protección Radiológica (BfS) de Alemania.

El interior del maniquí está relleno[106] de esferoides pequeños de cera de parafina[58], mientras que por fuera está cubierto con una capa del mismo material con un grosor constante de 6 mm, que corresponde a la cantidad de tejido blando que cubre el cráneo humano de una persona. La actividad de ^{241}Am fue añadida artificialmente en la superficie del hueso humano real con piezas rectangulares pequeñas de papel de filtro absorbente impregnado con una jeringuilla calibrada, sabiendo la cantidad de la solución de ^{241}Am . El

papel de filtro activado fue distribuido por toda la superficie del simulador de hueso con 3000 Bq por fuera de la superficie ósea y 2400 Bq en el interior del hueso, resultando una actividad total de 5400 ± 113 Bq en la fecha 1 de marzo de 1993.

El perímetro craneal es de 48 cm lo cual corresponde[88] al percentil del 50 %, según las tablas de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de un niño de 22 meses o de una niña de 31 meses, en promedio 2 años y 3 meses.



Figura 6.4: Maniquí de cráneo de niño de 2 años BfS

6.4. Método de calibración de ^{241}Am en hueso

La determinación de la actividad de americio retenida en el esqueleto se realiza midiendo una zona con gran contenido óseo y poco tejido blando que atenúe la radiación. La rodilla y el cráneo son los huesos más adecuados para medir. Una vez medida la actividad depositada en una de estas dos (o en las 2) partes del cuerpo, se puede extrapolar la actividad de americio depositada en todo el esqueleto, teniendo en cuenta la proporción de masa de hueso en la que se ha medido la actividad.

6.5. Resultados y discusión

Calibrar los detectores LEGe en cráneo es fundamental para determinar la contaminación de americio depositado en hueso. Los dos maniqués de cabeza disponibles son de tamaño de hombre y niño y hacen posible dos calibraciones dependientes de la edad.

6.5.1. Estudio previo de geometría de cráneo contaminado de ^{241}Am

Este estudio consiste en medir los cráneos en diferentes partes de la cabeza, para identificar la zona más eficiente desde el punto de vista de la detección, asumiendo una contaminación homogénea de americio en hueso. Se trata de determinar cuál es la geometría de contaje óptima, buscando la posición de la cabeza con respecto a los detectores, que favorezca el máximo rendimiento en la detección.

Las posiciones de medida consideradas se pueden distinguir como centrales y laterales. Las posiciones centrales están en el plano de simetría de la cabeza, las laterales están cercanas a los huesos temporales y esfenoides. La posición relativa del detector con respecto a la cabeza es en paralelo al punto de medida, a una distancia de 1 cm.

6.5.1.1. Cráneo de hombre

En el caso de la geometría de hombre adulto se utilizó el cráneo CIEMAT-Cohen. Fueron 9 las posiciones medidas[105] según se puede ver en la Figura 6.5, cuatro en el eje de simetría de la cabeza (posición 1 en el frontal; la 0 sobre el parietal y frontal, vertical de la cabeza; la posición 5 al final del parietal, en la coronilla; la posición 4 en el occipital), y cinco en los laterales (sobre los huesos temporal y esfenoides, en el lado derecho con las posiciones 2 y 3, en el lado izquierdo con las posiciones -2, -3 y 7). Las posiciones relativas del detector con respecto al cráneo CIEMAT-Cohen se muestran en la Figura 6.6. Las medidas se realizaron con el detector 1 del sistema LEGe en paralelo a la zona a medir, siendo el criostato vertical en todas las posiciones excepto en la posición 5 cuyo ángulo con la vertical es 57°.

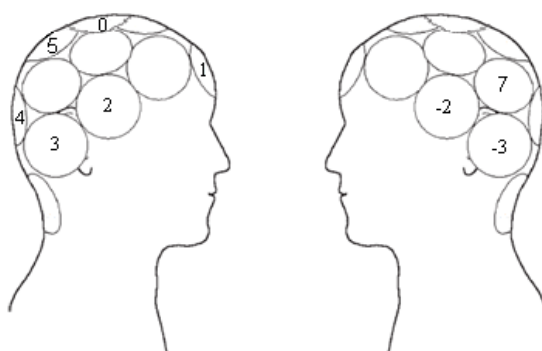


Figura 6.5: Geometrías de cráneo CIEMAT- Cohen consideradas en el estudio de eficiencias

Las medidas del ^{241}Am en cráneo con los 4 detectores LEGe tienen un espectro resultante que se muestra en la Figura 6.7. El pico espectral principal es de 59.5 keV y se observa en la parte izquierda del espectro. Los tiempos de medida han sido tales para que se obtuviera un área mínima de 10000 cuentas bajo este fotopico. Por eso dependiendo de la posición se han medido con diferentes tiempos, como se muestra en la Tabla 6.2. En dicha tabla se pueden ver los parámetros asociados a las medidas: el área del pico con su incertidumbre y factores de eficiencia (F_{eff})[104].

Los factores de eficiencia se calcularon con la actividad ^{241}Am en cráneo CIEMAT-Cohen de 975 ± 31 Bq corregida por decaimiento a la fecha 05/02/2014 considerando las cuentas de la emisión de 59.5 keV y aplicando la ecuación 2.1.










<p>1: en el centro del frontal</p>	<p>0: en la soldadura entre el frontal y el parietal.</p>	<p>5: en el centro del parietal. Detector 57º con la vertical</p>
		
<p>4: en la soldadura entre el parietal y el occipital</p>	<p>2: parte alta del hueso temporal derecho</p>	<p>3: soldadura del temporal, parietal y occipital derecho</p>
		
<p>-2: parte alta del hueso temporal izquierdo</p>	<p>-3: soldadura del temporal, parietal y occipital izquierdo</p>	<p>7: lateral del parietal izquierdo</p>
		

Figura 6.6: Geometrías de medida del cráneo CIEMAT-Cohen con el detector 1 del sistema LEGe.

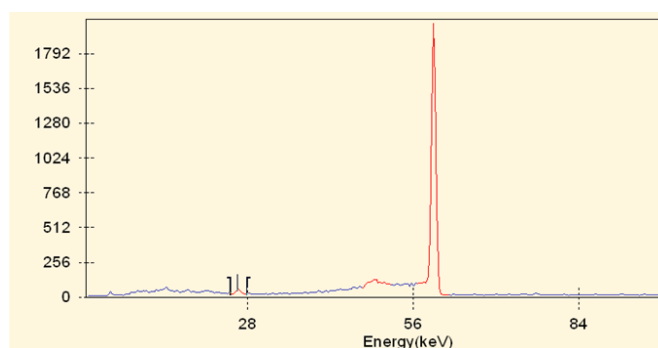
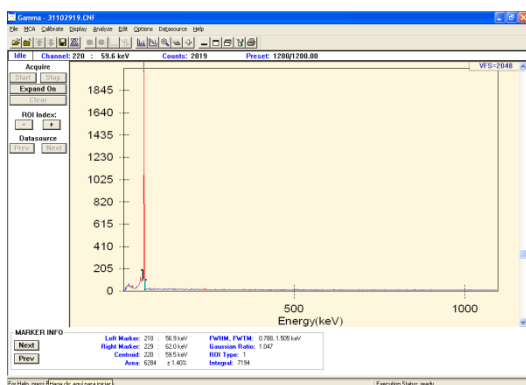


Figura 6.7: Espectro de ^{241}Am en cráneo CIEMAT-Cohen

Tabla 6.2: Eficiencias calculadas para las diferentes posiciones estudiadas para realizar la calibración.

Espectro	Posición/ inclinación	Centroide (Ch)	Área	ΔÁrea (Counts)	t (s)	Feff (cps/Bq)	ΔFeff (cps/Bq)
31103107	0/ 0º	219.96	13064	306	4800	$2.79 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
33103108	1/ 0º	219.96	9627	271	4800	$2.06 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$
33103102	4/ 0º	220.12	10186	182	4800	$2.18 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-5}$
33103127	5/57º	219.96	19185	368	7200	$2.77 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
33103122	2/ 0º	219.96	19418	369	7200	$2.61 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
33103124	3/ 0º	219.96	18327	356	7200	$2.45 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$
33103123	-2/ 0º	219.96	17195	347	7200	$2.61 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
33103125	-3/ 0º	219.96	18297	359	7200	$2.73 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
33103128	7/ 0º	219.96	16746	357	7200	$2.39 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$

Los resultados obtenidos del factor de eficiencia de cabeza de hombre adulto oscilan entre $2.06 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq en la frente y $2.79 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq en la soldadura entre el frontal y el parietal. La diferencia es muy pequeña, lo que da una idea de que la distribución de la contaminación de americio en el cráneo CIEMAT-Cohen se puede considerar homogénea.

La eficiencia en las posiciones 1 y 4 son las más bajas, debido a que es la finalización del hueso del cráneo. La posición 1 es en el frontal y tiene cercano los huesos de la cara, que están más alejados y tienen más atenuación debida al tejido blando. La posición 4 limita con el principio de la columna vertebral, por lo que disminuye la cantidad del hueso, tiene mayor tejido blando y por tanto se atenúa más la radiación.

6.5.1.2. Niño de 2 años

El maniquí utilizado para la calibración de americio en niño fue la cabeza BfS simuladora de un cráneo de 2 años. Se realizaron 5 medidas en diferentes posiciones, 3 en el eje de simetría de la cabeza y 2 en los laterales, como se muestra en la Figura 6.8. Las posiciones relativas entre el detector 1 y el maniquí se observan en la Figura 6.9.

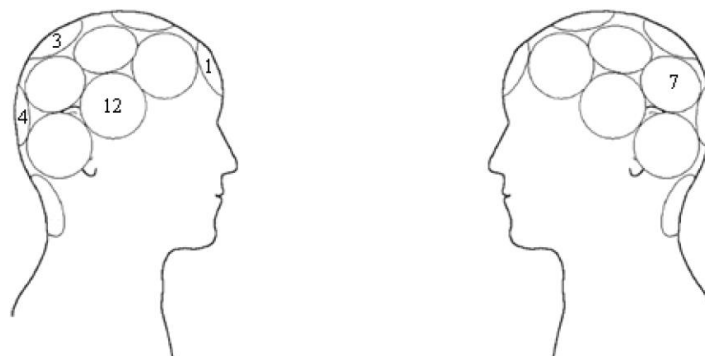


Figura 6.8: Geometrías de cráneo BfS consideradas en el estudio de eficiencias

Los tiempos de adquisición de la medida fueron de 30 minutos, obteniendo espectros similares a los de la Figura 6.7. Los factores de eficiencia se calcularon aplicando la ecuación 2.1, teniendo en cuenta que la actividad, corregida por decaimiento, del cráneo BfS es 5237 ± 110 Bq en la fecha 26/04/2012. En la emisión principal del ^{241}Am (59.5 keV) los F_{eff} varían entre $5.06 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq en las posiciones de los huesos parietal, cercano al occipital, y $5.90 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq en el lateral sobre el hueso temporal (Tabla 6.3). Los factores de eficiencia no presentan variaciones significativas, lo que indica de nuevo la homogeneidad de la actividad del ^{241}Am en todo el hueso craneal de la cabeza BfS.

Tabla 6.3: Factores de eficiencia de ^{241}Am en el cráneo BFS medido con el detector 1 del sistema LEGe

Espectro	Posición/ Inclinación (º)	Centroide (Ch)	Área (Cuentas)	ΔÁrea (Cuentas)	t (s)	F _{eff} (cps/Bq)	ΔF _{eff} (cps/Bq)
33102932	p3/57 º	219.96	55704	590	1800	$5.90 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$
33102930	P1 /43 º	219.96	49100	550	1800	$5.20 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
33102933	p4/0º	219.96	52850	576	1800	$5.60 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
33102934	p12/0º	219.96	47730	554	1800	$5.06 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
33102935	p7/0º	220.18	51344	596	1800	$5.44 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
33102936	p7/0º	219.96	52966	572	1800	$5.61 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$

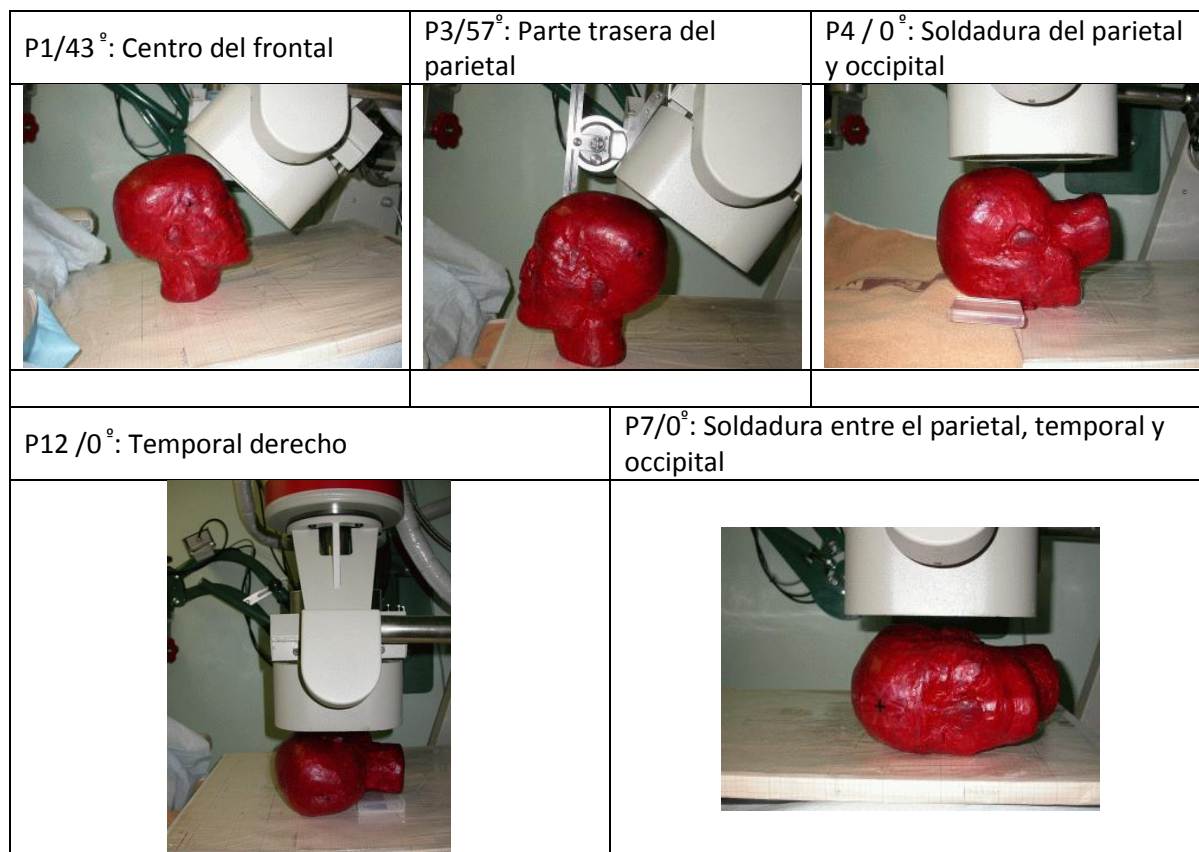


Figura 6.9: Geometrías de medida del cráneo BFS con el detector 1 del sistema LEGe

Los factores de eficiencia de las posiciones del maniquí BfS son mayores que las del cráneo CIEMAT-Cohen pero del mismo orden de magnitud.

6.5.2. Calibraciones para determinar ^{241}Am en cráneo

Calibrar el sistema de detección LEGe (4 detectores) consiste en una calibración en energías (energía en función del canal), una calibración de la resolución del pico, FWHM (anchura a media altura del pico espectral en función de la energía) y una calibración en eficiencia que relaciona la eficiencia con la energía.

6.5.2.1. Calibración en energía y anchura del pico (FWHM) del sistema LEGe

La calibración en energía y resolución del sistema de detección LEGe utilizada para medir plutonio en pulmón es la misma que la utilizada en actínidos en hueso, explicada en el capítulo 5. Se calibró el espectro suma (All_summed) de las cuatro señales de los detectores, en el rango energético de 10-1000 keV, según se ha descrito en el apartado 5.5.1.1.

6.5.2.2. Calibración en eficiencia de ^{241}Am en cráneo de hombre adulto

La calibración de cráneo se realiza con el maniquí de cabeza CIEMAT-Cohen. Alrededor del cráneo hay muy poco tejido muscular que atenúe los fotones emitidos, por esta razón es una zona muy útil para poder estimar la actividad de la contaminación. Se realizaron dos calibraciones, una sobre el parietal y frontal, y otra sobre el frontal.

A.1. Calibración en el parietal y frontal del cráneo. En el estudio previo se identificó que la vertical de la cabeza sobre los huesos parietal y frontal es la zona más eficiente. Es la zona elegida para la calibración con los 4 detectores. La geometría de medida es una geometría envolvente, los detectores se separan por pares hasta un ángulo de 20° y se mueven en bloque. Los detectores están sobre la cabeza en posición vertical, la distancia detectores- cabeza es de 2 cm (ver Figura 6.10).



Figura 6.10: Geometría de calibración en la vertical del cráneo de hombre con maniquí CIEMAT-Cohen

Se realizaron dos medidas en esta geometría (Tabla 6.4) el día 05/02/2014 cuya actividad de ^{241}Am en el cráneo era de 975 ± 31 Bq. Los factores de calibración en eficiencia fueron calculados teniendo en cuenta las cuentas en el área del fotopico de 59.5 keV, el tiempo de medida y la actividad de referencia, aplicando la ecuación 2.1. Como resultado se obtiene un factor de eficiencia $\text{Feff}(59.5 \text{ keV}) = 5.4 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-4}$ cps/Bq.

Tabla 6.4: Factores de eficiencia en 59.5 keV en cráneo en geometría envolvente en la posición vertical, sobre el parietal y frontal del cráneo

Espectro	Centroide (Ch)	Área (Cuentas)	Δ Área (Cuentas)	t (s)	Feff (cps/Bq)	Δ Feff (cps/Bq)
31102919	219.75	6344	513	1200	$5.4 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
31102920	219.75	37740	528	7200	$5.38 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$
Promedio					$5.4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$

A.2. **Calibración en el frontal del cráneo.** La geometría es de 4 detectores en pares con un ángulo entre ellos de 20° que envuelven al cráneo por el hueso frontal con una distancia de 2 cm (ver Figura 6.11).



Figura 6.11: Geometría de calibración de frente del cráneo de hombre adulto, con maniquí CIEMAT- Cohen

Debido a las limitaciones de movimiento de los detectores con la silla, y a la poca diferencia existente entre los Feff se consideró más adecuada esta geometría. Los resultados de las medidas están dados en la Tabla 6.5, y el factor de eficiencia resultante Feff es $\text{Feff}(59.5\text{keV}) = 5.7 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$ cps/Bq.

Tabla 6.5: Resultados de eficiencia para calibración en cráneo en geometría detectores a 2 cm en el frontal

Espectro	Centroide (Ch)	Área (Cuentas)	Δ Área (Cuentas)	t (s)	Feff (cps/Bq)	Δ Feff (cps/Bq)
31103781.CNF	219.9	26636	426	4800	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$

6.5.2.3. Validación de calibraciones en la determinación de ^{241}Am en cráneo de hombre

La validación consiste en hacer medidas en la misma geometría que la de calibración y calcular la actividad con la eficiencia de calibración.

- **Validación de la calibración de cráneo en los huesos temporal y frontal.** Las medidas de validación de la calibración vertical se realizaron con el maniquí CIEMAT-Cohen. La actividad de ^{241}Am se calculó con el factor de eficiencia $5.4 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-4}$ cps/Bq. A diferencia de los casos anteriores (tiroides, pulmón) no se dispone de un maniquí de validación diferente al de calibración.

Tabla 6.6: Validación de la calibración de ^{241}Am en cráneo de hombre en la posición vertical

Espectro	Centroide (Ch)	Área (cuentas)	Δárea (cuentas)	t (s)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Br
31103793.CNF	219.9	7166	221	1200	1106	54	0.1368
31103794.CNF	219.9	7204	215	1200	1112	53	0.1428
31103795.CNF	219.9	7156	220	1200	1104	54	0.1351
31103796.CNF	219.9	7078	222	1200	1092	54	0.1228
31103797.CNF	219.9	7385	222	1200	1140	54	0.1714
						Br	0.1418
						SBr	0.0181

Teniendo en cuenta que la actividad de referencia es 973 ± 31 Bq en la fecha de medida 07/02/2014. La exactitud y precisión calculadas según la norma ISO 28218 son $\text{Br} < 0.15$ y $\text{SBr} < 0.02$, (Tabla 6.7), por lo que se cumplen los criterios de exactitud Br en $[-0.25, 0.50]$ y precisión $\text{SBr} < 0.4$.

Tabla 6.7: Validación de calibración ^{241}Am en cráneo de hombre en la posición del frontal

Espectro	Centroide (Ch)	Área (cuentas)	Δarea (cuentas)	t(s)	A(Bq)	ΔA (Bq)	Bri
31103782.CNF	219.9	14413	317	2700	938	51	-0.0380
31103783.CNF	219.9	14234	313	2700	926	50	-0.0499
31103784.CNF	219.9	14285	317	2700	930	50	-0.0465
31103785.CNF	219.9	14456	318	2700	941	51	-0.0351
31103786.CNF	219.9	14313	316	2700	932	50	-0.0446
						Br:	-0.0428
						SBr	0.0061

- **Validación de la calibración de cráneo en el frontal.** La validación de la calibración de frente se realiza con el maniquí CIEMAT-Cohen. El factor de eficiencia aplicada para el cálculo de la actividad del ^{241}Am es de $5,7 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$ cps/Bq.

Teniendo en cuenta que la actividad de ^{241}Am en la fecha de medida era 975 ± 31 Bq (05/02/2014), los resultados de exactitud y precisión, calculados con las ecuaciones

2.5 y 2.7, son -0.043 y 0.006 respectivamente; se muestran en la Tabla 6.7 y cumplen los criterios de aceptación de la norma ISO 28218.

6.5.2.4. Calibración en eficiencia de ^{241}Am en cráneo de niño de 2 años

El mayor factor de eficiencia de detección, Feff, obtenido en el estudio previo de la cabeza del niño de 2 años es en la posición 3 sobre el hueso parietal, en la coronilla. Es una posición incómoda para el sujeto, y como la variabilidad del Feff en todo el cráneo es pequeña, se calibró, como en el caso anterior, en la geometría vertical de la cabeza, sobre los huesos parietal y frontal. La geometría de medida es una geometría envolvente, los detectores se separan por pares en un ángulo de 16° y se mueven en bloque, para envolver el cráneo del maniquí de calibración en la vertical de la cabeza; la distancia detectores- cabeza es de 2 cm (ver Figura 6.12). El maniquí de cráneo utilizado es el BfS cuya actividad de ^{241}Am es 5239 ± 110 Bq en la fecha de medida, 07/02/2014.

Se realizaron dos medidas, a partir del área del pico de 59.5 keV, del tiempo de medida y de la actividad de la fuente, se calculó el factor de eficiencia, ver Tabla 6.8.



Figura 6.12: Geometría de calibración de niño de 2 años

Tabla 6.8: Calculo de eficiencia para la emisión de 59.5 keV en una geometría de niño de 2 años.

	Espectro	Centroide (ch)	Area (cuentas)	Δ Area (cuentas)	t(s)	FEff (cps/Bq)	Δ FEff (cps/Bq)
BFS	31102926	219.7	80462	700	1200	$1.28 \cdot 10^{-2}$	$3.80 \cdot 10^{-4}$
BFS	31102927	219.7	479801	1727	7200	$1.27 \cdot 10^{-2}$	$3.13 \cdot 10^{-4}$
						$1.28 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$

El resultado final del factor de calibración en eficiencia de detección, calculado a partir del área del pico, el tiempo de medida y la actividad de referencia del cráneo (ecuación 2.1) es $\text{Feff} (59.5\text{keV}) = 1.28 \cdot 10^{-2} \text{ cps/Bq} \pm 4 \cdot 10^{-4} \text{ cps/Bq}$.

6.5.2.5. Validación de calibración de ^{241}Am en cráneo de niño de 2 años

La validación de la calibración de cráneo de niño de 2 años, se realizó con el cráneo BfS en la misma geometría que la de calibración. El cálculo de la actividad de ^{241}Am se realizó con la eficiencia calculada del factor de eficiencia $1.28 \cdot 10^{-2} \pm 3 \cdot 10^{-4}$ cps/Bq.

La exactitud y precisión de la actividad se calculan según la norma ISO 28218, teniendo en cuenta que la actividad de ^{241}Am de referencia del cráneo BFS es de 5239 ± 110 Bq.

Como resultado de las medidas la exactitud de la actividad es 0.029 y la precisión 0.0023, ambos valores cumplen los criterios de aceptación de la norma ISO28218.

Tabla 6.9: Medidas de validación de calibración de niño de 2 años.

Espectro	ROI	Area (cuentas)	Δ Area (cuentas)	t (s)	Aref (Bq)	A (Bq)	Δ A (Bq)	Bri
31102964	219.7	82575	710	1200	5239	5392	33	0.0291
31102965	219.7	82544	710	1200	5239	5390	33	0.0287
31102966	219.7	82328	716	1200	5239	5376	33	0.0260
31102967	219.7	82802	712	1200	5239	5407	33	0.0320
31102968	219.7	82397	717	1200	5239	5380	33	0.0269
						Br		0.0285
						SBr		0.0023

6.5.3. **Determinación de actividad en esqueleto**

La actividad en esqueleto se puede determinar a partir de la medida *in-vivo* en una parte del esqueleto. La actividad de ^{241}Am medida en cráneo se puede extrapolar a todo el esqueleto a partir de la proporción en masa de esqueleto que se ha medido. Las proporciones en masa de hueso de todo el esqueleto[56] depende de la edad y sexo.

El cráneo correspondiente a un hombre adulto tiene la proporción de masa de $12.4 \pm 1.4\%$ de todo el esqueleto[56], la actividad de ^{241}Am es de 973 ± 31 Bq, por tanto la actividad total en esqueleto sería de 7847 ± 1136 Bq.

La proporción del cráneo en el esqueleto del niño de 2 años no se sabe, ya que este dato no aparece en la publicación ICRP 89. El porcentaje de masa de cráneo de un niño recién nacido es $39.9 \pm 3.1\%$ del esqueleto[56], y esta proporción se va reduciendo hasta la llegar a la proporción de hombre. Supongamos una variación lineal con la edad de la proporción de cráneo, se puede calcular así la proporción de masa de cráneo con respecto al esqueleto en el niño de 2 años. La masa de cráneo de mujer adulta es $11.9 \pm 0.8\%$ del esqueleto[56]. Como promedio de hombre y mujer la proporción es $12.15 \pm 1.1\%$. Teniendo en cuenta la diferencia de proporciones entre adulto y recién nacido, 27.75% , en 18 años que es lo que se tarda en llegar a la edad adulta, en cada año la diferencia

el cambio de proporción es de 1.5 %, por tanto en dos años de edad la diferencia de la proporción es 3.0%. Con lo que restándolo de la proporción inicial, la proporción de esqueleto para el niño de 2 años es de 36.9 ± 1.0 %.

Teniendo en cuenta este planteamiento y que la actividad del maniquí BfS es de 5239 ± 110 Bq, la actividad total del esqueleto sería de 14198 ± 683 Bq.

6.6. Límite de detección de ^{241}Am en cráneo

Para obtener el límite de detección (LD) en cada geometría de contaje se realiza una medida de una persona blanco y se analiza con el factor de eficiencia correspondiente. Se calcula el LD de acuerdo con la norma ISO 28218, según la ecuación 2.8.

El resultado del LD para el ^{241}Am en cráneo de hombre con geometría envolvente en la vertical de la cabeza, para un tiempo de medida de 1200 s es de 13.9 Bq; y para la calibración frontal con el tiempo de medida de 1200 s es de 12.7 Bq.

El LD del ^{241}Am en cráneo de niño de dos años con geometría envolvente en la vertical de la cabeza, en un tiempo de medida de 1200 s es de 7.2 Bq.

El método y resultados de este trabajo han sido publicados en la revista Radiation Protection Dosimetry como *Efficiency study of a LEGe detector system for the assessment of ^{241}Am in skull at CIEMAT whole body counter*[105].

6.7. Intercomparación de Cráneos organizada por EURADOS

La intercomparación de EURADOS de medida y simulación Monte Carlo de americio en 3 cráneos consistió en medir diferentes maniqués de cráneo de diferentes distribuciones y tamaños.

En este ejercicio de EURADOS se pudo medir un maniquí de cráneo fabricado por USTUR (US Transuranium and Uranium Registries), cuyas dimensiones son semejantes al maniquí CIEMAT-Cohen, pero la distribución de la contaminación no es homogénea. La mitad derecha es un cráneo real con americio correspondiente al cadáver de un trabajador que se contaminó por incorporación de ^{241}Am durante su vida laboral[109]. La mitad izquierda es hueso real humano pero sin contaminación. La actividad es de $287,0 \pm 3.7$ Bq de ^{241}Am en la fecha 03/05/2012.

La intercomparación de EURADOS también requería medir un maniquí artificial fabricado esencialmente para la simulación Monte Carlo de una geometría simple y muy bien

definida. Se trata de casquete simulador de coronilla fabricado por SURO[110] con distribución homogénea de actividad. Dicha actividad es de 981 ± 49 Bq de ^{241}Am en la fecha 26/04/2012.

Además el cráneo BfS descrito anteriormente se recibió en el CIEMAT como parte de este ejercicio de intercomparación organizado por EURADOS y permitió al laboratorio de CRC-CIEMAT realizar la calibración de niño de 2 años.

La intercomparación EURADOS tenía 2 fases, la primera consistía en hacer un estudio de eficiencia de las diferentes cabezas y la segunda en medir su actividad.

- **Estudio de eficiencias.** En todos los cráneos (Figura 6.13) se hizo un estudio de las eficiencias de la cabeza. El casquete craneal SURO solo se midió en el centro, en la posición 0. Sin embargo, en la cabeza USTUR se hizo el estudio midiendo con un solo detector las zonas que se muestran en la Figura 6.14.



Figura 6.13: Maniqués de cráneo de izquierda a derecha USTUR, SURO y BFS.

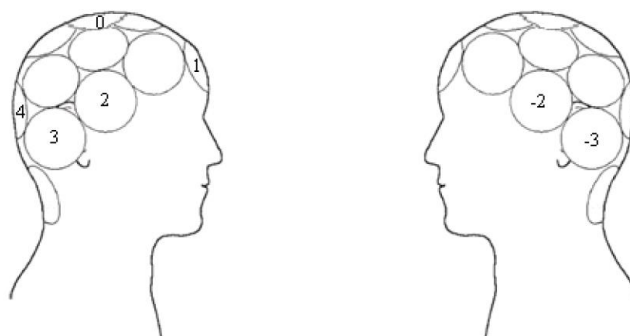


Figura 6.14: Esquema de las posiciones de eficiencia medidas en el maniquí USTUR, en el lateral donde se encuentra el hueso humano con contaminación real de ^{241}Am .

El casquete SURO se midió con el detector 1 del sistema LEGe en una única posición, según se muestra en la Figura 6.15. La distancia entre el casquete-detector es de 1 cm.

El factor de eficiencia, F_{eff} , se calculó a partir del área del pico de 59.5 keV, el tiempo de medida y la actividad del casquete SURO (Tabla 6.10).



Figura 6.15: Medida del maniquí SURO con el detector 1 del sistema LEGe

Tabla 6.10: Factor de eficiencia del detector 1 del sistema LEGe con el casquete SURO

Espectro	Posición/ inclinación	Centroide (Ch)	Área	Δ Área (Counts)	t (s)	F_{eff} (cps/Bq)	ΔF_{eff} (cps/Bq)
33102937	P1/0°	219.96	62332	642	7200	$8.82 \cdot 10^{-3}$	$4.50 \cdot 10^{-4}$

El maniquí USTUR se midió con el detector 1 del sistema LEGe con una distancia al maniquí de 1 cm (Figura 6.16). Los factores de eficiencia se calcularon y se muestran en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11: Factores de eficiencia del detector 1 del sistema LEGe con el maniquí USTUR

Espectro	Posición/ Inclinación	Centroide (Ch)	Área	Δ Área (Counts)	t (s)	F_{eff} (cps/Bq)	ΔF_{eff} (cps/Bq)
33102946	P0/0°	219.96	11144	271	10800	$3.6 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
33102947	P1/34.5°	219.96	7850	256	10800	$2.53 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$
33102962	P4/26.5°	220.09	6186	143	9091	$2.37 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$
33102958	P2/0°	219.96	12939	314	10800	$4.2 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
33102948	P-2/0°	219.96	5456	136	21600	$8.8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
33102961	P3/16.8°	220.8	12487	202	10800	$4.03 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-5}$
33102959	P-3/16.8°	219.96	3090	206	21605	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$

La comparativa de los factores de eficiencia en el área del fotopico del ^{241}Am (59.5 keV), en las geometrías estudiadas de todos maniqués con el detector 1 del sistema LEGe[105] son del mismo orden de magnitud, y se representan en la Figura 6.17.

En la posición 0 el maniquí con mayor factor de eficiencia es el casquete SURO. Ligeramente menor son los factores de eficiencia del maniquí BfS, de 10^{-3} cps/Bq, que apenas tiene variabilidad entre las diferentes posiciones, al igual que el maniquí CIEMAT-Cohen, que da lugar a un factor de eficiencia menor comparado con el del BfS. Sin embargo el maniquí USTUR a pesar de que los factores de eficiencias, en

algunas posiciones son muy parecidos a las del cráneo CIEMAT-Cohen, hay más diferencia entre el lateral que está contaminado y el que no lo está, como era de esperar.

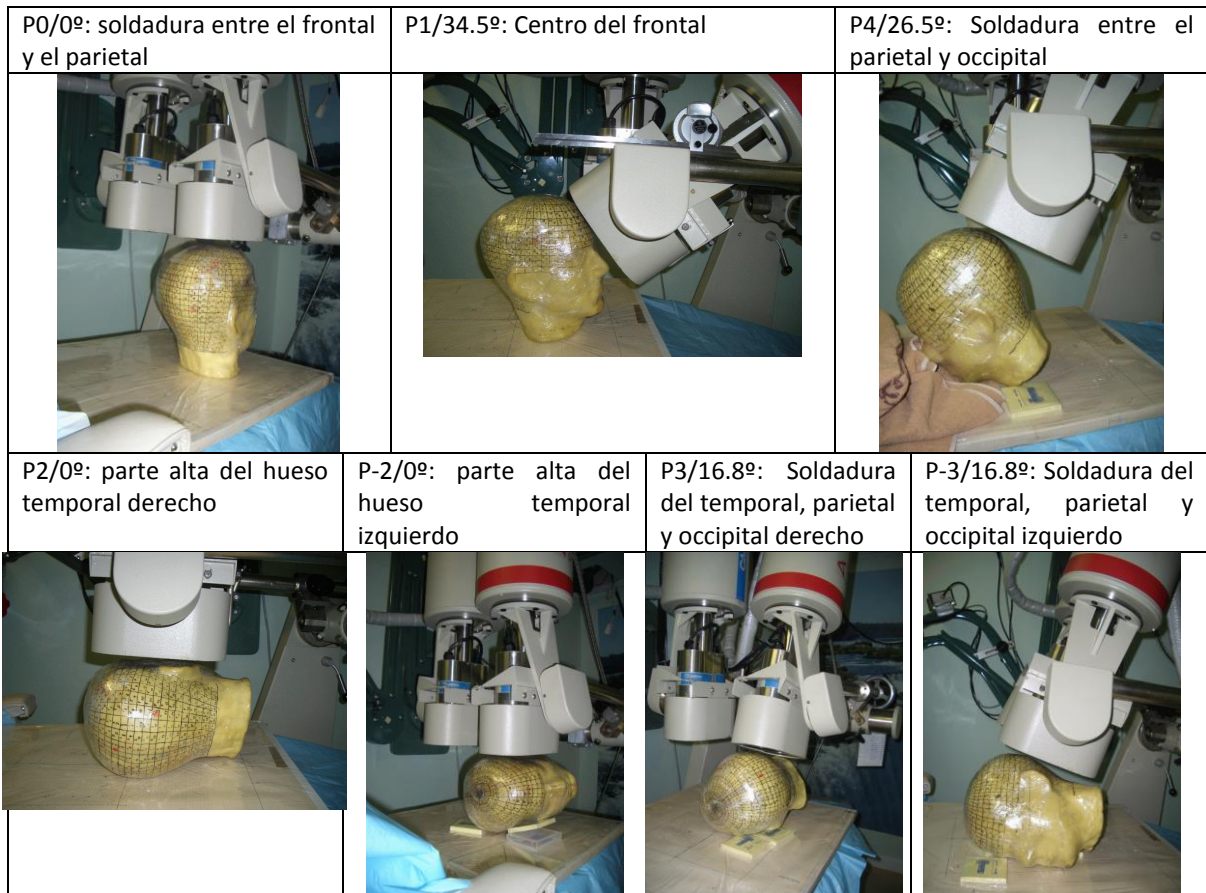


Figura 6.16: Estudio de los factores de eficiencia de las diferentes posiciones del maniquí USTUR

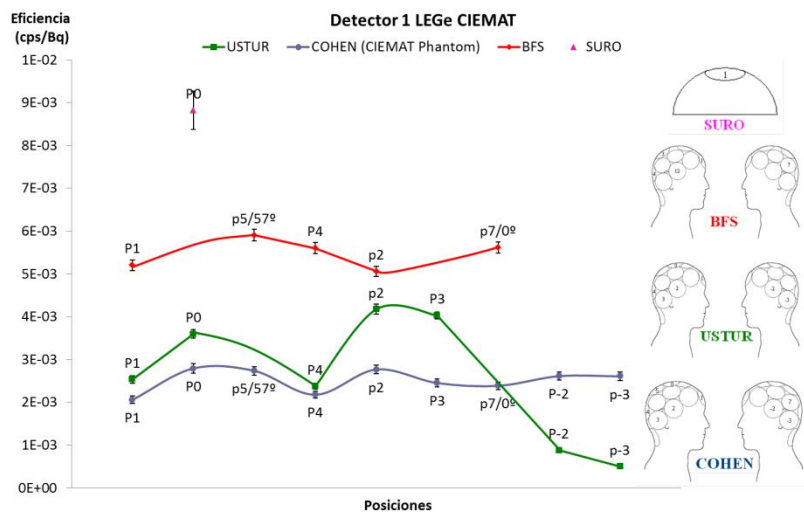


Figura 6.17: Variación de los factores de eficiencia en las diferentes posiciones de los detectores-cráneos

- **Valoración de la actividad.** La Figura 6.18 muestra la geometría de medida de los diferentes maniqués tipo cráneo, utilizando la misma geometría de calibración. Dicha

geometría consiste en situar los detectores sobre la vertical de la cabeza con 20° grados de inclinación entre sí para el cráneo adulto, y 16° sobre el cráneo del niño de 2 años. Los resultados de actividad se obtuvieron analizando las medidas con los factores de eficiencia de detección obtenidos en las dos calibraciones correspondientes al hombre adulto y al niño.

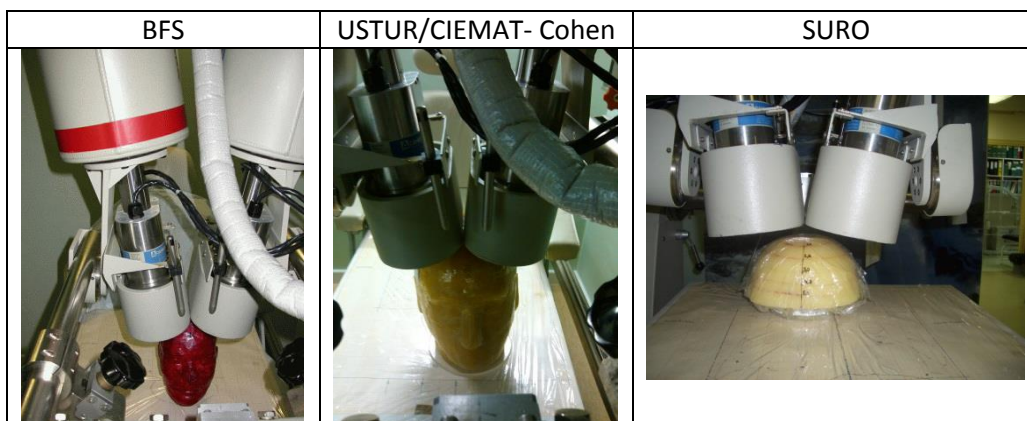


Figura 6.18: Geometría de medida de los tres maniqués, utilizando los 4 detectores

Los resultados de la actividad de americio calculados con el factor de eficiencia de la calibración de los 4 detectores con el maniquí CIEMAT-Cohen $5.4 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-5}$ cps/Bq, se muestran en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Resultados de la actividad de los diferentes cráneos de la intercomparación calculados con la eficiencia de hombre adulto

	Espectro	Centroide (Ch)	Área (Cuentas)	Δ Área (Cuentas)	t (s)	A (Bq)	Δ A (Bq)	Aref (Bq)	Bri
USTUR	31102918	219.8	1957	124	1200	301	36	287	0.0482
USTUR	31102921	219.8	11306	317	7200	290	24	287	0.0094
Cohen	31102919	219.8	6344	213	1200	975	87	975	0.0004
Cohen	31102920	219.8	37740	528	7200	967	67	975	-0.0081
BFS	31102926	219.8	80462	700	1200	12361	792	5239	1.3593
BFS	31102927	219.8	479801	1727	7200	12284	724	5239	1.3446
SURO	31102944	219.8	121426	899	7200	3112	195	981	2.1706
SURO	31102943	219.8	20392	365	1200	3134	230	981	2.1937

También se ha calculado el valor de la actividad de ^{241}Am con el factor de eficiencia de la calibración de 2 años, $1.28 \cdot 10^{-2} \pm 3 \cdot 10^{-4}$ cps/Bq obtenido con la cabeza BfS, de forma que se han obtenido las exactitudes y entran dentro de los criterios de aceptación según la norma ISO 28218.

Las actividades del maniquí USTUR analizadas con la calibración de hombre adulto tienen una exactitud <5 % lo que significa que a pesar de que la distribución de la contaminación no es homogénea, es adecuada para su análisis. Sin embargo, analizando con la eficiencia de hombre adulto las medidas del maniquí de niño BfS,

hay una desviación de la exactitud de 136 % y las del casquete SURO la exactitud es de <220 %.

Tabla 6.13: Resultados de la actividad de los diferentes cráneos de la intercomparación calculados con la eficiencia de niño de 2 años

	Espectro	Centroide (Ch)	Area (Cuentas)	ΔÁrea (Cuentas)	t (s)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Aref (Bq)	Bri
USTUR	31102918	219.8	1957	125	1200	128	9	287	-0.5544
USTUR	31102921	219.8	11306	317	7200	123	4	287	-0.5709
Cohen	31102919	219.8	6344	213	1200	415	16	975	-0.5747
Cohen	31102920	219.8	37740	528	7200	411	8	975	-0.5783
BFS	31102926	219.8	80462	700	1200	5255	78	5239	0.0029
BFS	31102927	219.8	479801	1727	7200	5222	51	5239	-0.0033
SURO	31102944	219.8	121426	899	7200	1323	18	981	0.3478
SURO	31102943	219.8	20392	365	1200	1332	32	981	0.3576

Al analizar con la eficiencia de niño de 2 años las medidas de los cráneos de hombre adulto, la desviación de la exactitud es < 58 %, las del casquete SURO tienen una exactitud de < 36 % y su propia geometría es < 1 %.

El casquete SURO no tiene una geometría muy realista, pero al no ser la cabeza completa se puede asemejar más a un cráneo pequeño. El análisis de su medida con la eficiencia de adulto resultan actividades con desviaciones muy altas.

6.8. Incertidumbres

Las incertidumbres de las actividades de ²⁴¹Am medidas en cráneo tienen en cuenta los factores de eficiencia que influyen en la medida, tales como: el área neta del pico, la eficiencia del detector, la intensidad de emisión, el tiempo de medida la actividad de referencia se calculan según se explica en el apartado 2.6. La incertidumbre, en este caso particular, de ²⁴¹Am en esqueleto depende fuertemente de la geometría de medida y del propio sistema de detección. La guía IDEAS sugiere unos valores de las incertidumbres de tipo B para la evaluación de la actividad de ²⁴¹Am en cráneo según se muestran en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14: Valores sugeridos de las incertidumbres, tipo B para la evaluación de la actividad de ²⁴¹Am en cráneo. IDEAS Guidelines[66]

Fuente de incertidumbre	SF _B
Maniquí de calibración	1.06
Posición del detector	1.13
Dependencia del tamaño del cráneo	1.24
Distribución de la actividad	1.11*
Análisis del espectro	1.08
Total	1.33

*Posible diferencia de la distribución de la fuente entre el maniquí de calibración y el sujeto medido.

Además, la actividad de todo el esqueleto se requiere en modelos biocinéticos[66], por lo que la incertidumbre de la proporción entre el cráneo en el esqueleto, que supone $SF_B=1.16$, también contribuirá. Por lo tanto la incertidumbre SF_B de la actividad de ^{241}Am en esqueleto está basado en la medida de cráneo y puede ser evaluada como $SF_B=1.38$.

6.9. Conclusiones de medida de americio en hueso

Las conclusiones del capítulo 6 de la medida de americio en hueso se exponen a continuación:

1. Los resultados del estudio de medidas de ^{241}Am en distintas posiciones de los cráneos Cohen-CIEMAT (cabeza de adulto) y BfS (cabeza de niño) demuestran que ambos son simuladores de contaminación homogénea de este radionucleido y les hace adecuados como fuentes de calibración de americio en hueso con detectores de semiconductor de germanio, LEGe.
2. La posición craneal más eficiente es en la zona del parietal y frontal. Se calibró en esta geometría con los 4 detectores del sistema LEGe, para las dos configuraciones de adulto y de niño. Además, en el caso de hombre adulto se realizó otra calibración en la geometría del frontal, puesto que es la una posición más confortable para la persona que se mide.
3. El CRC-CIEMAT participó en un ejercicio internacional de intercomparación organizada por EURADOS para la medida de ^{241}Am en hueso en 3 maniqués tipo cráneo (entre ellos el cráneo BfS). El análisis de las medidas de los diferentes cráneos con el factor de eficiencia obtenido en CIEMAT con el maniquí CIEMAT-Cohen (adulto) supone grandes desviaciones de exactitud, excepto en el caso de la medida del maniquí USTUR sobre la zona con hueso real contaminado con americio. Esto es debido a que las dimensiones de la cabeza USTUR son similares a las del maniquí de calibración del CIEMAT. Sin embargo, cuando hay más diferencia en el tamaño de la cabeza, la desviación de la actividad medida con respecto a la actividad de referencia es mucho mayor y por tanto poco realista para el análisis de la actividad del ^{241}Am en cráneo.
4. El límite de detección (LD) de ^{241}Am en cráneo de hombre es de 13.9 Bq y el de niño de 2 años es 7.2 Bq, ambos para un tiempo de medida de 20 minutos.
5. La técnica de medida *in vivo* de americio en hueso desarrollada en el CRC-CIEMAT aplica a medidas post-accidente en casos de incorporación aguda o crónica de ^{241}Am .

6. Se concluye la necesidad de desarrollar maniqués más realistas que simulen la contaminación de americio en cráneo en individuos de diferentes edades. Sería muy adecuado para poder obtener valores fiables de la cantidad de actividad de ^{241}Am que permanece en el cráneo.

Capítulo 7: Medida de emisores gamma en heridas en emergencia radiológica y nuclear

7.1. Introducción

Las medidas en heridas contaminadas no están asociadas a la vigilancia rutinaria de trabajadores[111], sin embargo accidentes con heridas ocurren en situaciones de exposición ocupacional, en trabajadores expuestos (TE). Los riesgos de accidentes son mayores en situaciones de trabajos manuales tales como corte, mecanizado, perforación o inyecciones médicas de radioisótopos.

En la exposición interna vía heridas, el material retenido soluble es transferido directamente a la sangre y por tanto, se distribuye rápidamente por todo el cuerpo. El material insoluble permanece inicialmente en la vía de entrada (la herida) donde se va disolviendo y se transfiere lentamente hacia la sangre y la linfa hasta que acaba entrando en el torrente sanguíneo.

Una fracción variable de material insoluble puede ser retenida en la herida o en el tejido linfático bastante tiempo, dependiendo de la lesión, de la dimensión de la herida y de su profundidad. Pueden producirse distintos tipos de herida: inyección intravenosa, punción, corte, abrasión, quemado.

Los controles especiales para la determinación de la actividad en la herida se han de realizar en las áreas contaminadas o en heridas con material contaminante. Se trata de medidas rápidas de 5-10 minutos para medir radionucleidos emisores de RX y radiación γ . Si la contaminación es por radionucleidos emisores α y β , hay que utilizar técnicas *in vitro* para medir la concentración de actividad en excretas y así obtener la actividad incorporada.

7.2. Objetivo

Este trabajo tiene como finalidad determinar los radionucleidos emisores gamma que se depositan en heridas cuando la incorporación de la contaminación se produce a través de lesiones en la piel. Se han calibrado el detector 1 LEGe en el interior de la cámara blindada del laboratorio CRC-CIEMAT en geometría de heridas considerando el depósito de actividad en diferentes profundidades. Además, se han determinado los límites de detección asociados a las calibraciones.

7.3. Materiales

7.3.1. Detectores

El detector utilizado para la medida de emisores gamma en heridas es el detector 1 de semiconductor de germanio del sistema Low Energy Germanium LEGe, con un rango de detección de 10-1000 keV. Está ubicado en el interior de una cámara blindada de bajo fondo radiactivo, y se ha descrito en el apartado 2.3.1 de este trabajo.

7.3.2. Patrones de calibración de heridas

Los maniqués simuladores de la contaminación de heridas con material radiactivo consisten en discos de 10 cm de diámetro y 2 mm de grosor, de etilvinilacetato (goma EVA) utilizado como simulador de lípidos[58] y es equivalente a tejido de la piel (Figura 7.1). La contaminación se ha simulado a partir de una gota radiactiva en el centro del disco que está extendida a su alrededor en un círculo de diámetro 5 cm. Otros nueve discos blanco (sin contaminación) de la misma composición y tamaño son apilables para simular heridas con la localización de los radionucleidos a diferentes profundidades. Están diseñados y fabricados por IRSN (Institut de la Radioprotection et de la Sûreté Nucléaire), y fueron utilizados para un ejercicio de intercalibración entre laboratorios europeos organizado por dicha entidad en el año 2017, en el que participó el laboratorio del CRC-CIEMAT[92, 112].



Figura 7.1: Maniqué de heridas del IRSN fabricado con láminas de goma EVA. Fuente: IRSN

La contaminación en la superficie de la piel se simula tan solo con el disco “fuente”. Para simular la contaminación en profundidad se coloca sobre el disco fuente, tantos discos blancos (2 mm de grosor) como se quiera considerar la profundidad de la contaminación en la herida.

Las fuentes de referencia S25447 y S25451 son de radionucleidos y actividades conocidas (ver Tabla 7.1) y se utilizan para calibrar los sistemas de detección. Ambas contienen varios radionucleidos: la primera está formada por ^{241}Am , ^{57}Co y ^{137}Cs , la segunda está formada por ^{133}Ba y ^{85}Sr , sus emisiones energéticas se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.1: Actividad de radionucleidos de maniqués utilizados en calibración de heridas

Fuente	Radionucleido	Actividad (Bq)	Incertidumbre (Bq)	Fecha referencia
S25447	^{241}Am	913.3	34.8	20/05/2016 12:00:00
	^{57}Co	3690.0	85.4	
	^{137}Cs	680.6	18	
S25451	^{133}Ba	1126.1	•32.6	20/05/2016 12:00:00
	^{85}Sr	10338.9	319.6	

Tabla 7.2: Emisiones energéticas e intensidades de emisión de las fuentes radiactivas utilizadas en la calibración de heridas

Fuente	Radionucleido	Energía γ (keV)	Ie (%)
S25447	^{241}Am	17.7	19.5
		20.9	4.8
		26.4	2.4
	^{57}Co	59.5	35.9
		122.1	85.6
		136.5	10.7
S25451	^{137}Cs	661.6	85.1
		81.0	34.06
	^{133}Ba	276.4	7.164
		302.9	18.33
		356.0	62.05
		383.9	8.94
	^{85}Sr	514.0	96

7.4. Método de calibración de heridas

En este trabajo se han realizado primero calibraciones en herida con el detector 1 LEGe situado en el interior de la cámara blindada de bajo fondo radiactivo, descrito en el capítulo 2. Como se ha explicado anteriormente, la calibración en energía relaciona la energía con los canales del espectro y así permite identificar las energías de los fotones provenientes de fuentes desconocidas. Se realizó una calibración en energías y resolución con la metodología explicada en el capítulo 2.

En este trabajo se muestra la calibración en eficiencia de detección en función de la energía, en la geometría de contaje de heridas, para diferentes profundidades de la localización de la actividad de la fuente.

7.5. Resultados y discusión

Las calibraciones en heridas se hicieron situando el maniquí lo más cercano posible y centrado bajo el detector, con el fin de optimizar la eficiencia de detección. En la calibración de heridas hubo que tener en cuenta la profundidad dónde se encuentra la contaminación.

7.5.1. Calibraciones para determinar emisores gamma en heridas en el detector 1 del sistema LGe

La determinación de emisores γ en heridas requiere una calibración en energía y FWHM y una calibración en eficiencias en geometría de herida. Sendas calibraciones permiten identificar contaminantes retenidos en heridas y cuantificar su actividad.

7.5.1.1. Calibración en energía y resolución de anchura del pico (FWHM) del sistema LGe

La calibración en energía y resolución del detector 1 LGe es utilizada para medir emisores gamma en heridas en el rango energético de 10-1000 keV, (cadena electrónica con ganancia en 10); con 4094 canales, de forma que cada canal es aproximadamente 0.2 keV.

La calibración en energía y FWHM del detector 1 LGe se realizó con el maniquí de calibración en heridas, S25447 con los radionucleidos ^{241}Am , ^{57}Co y ^{137}Cs . En las medidas se obtienen diferentes picos del espectro. Cada pico (canal) se relaciona con la energía del radionucleido correspondiente, de forma que representando la energía en función del canal (ver Figura 7.2) se obtiene una relación lineal energía-canal (ecuación 7.1). Simultáneamente se realizó la calibración en resolución (FWHM en función de la energía), obteniendo la ecuación 7.2.

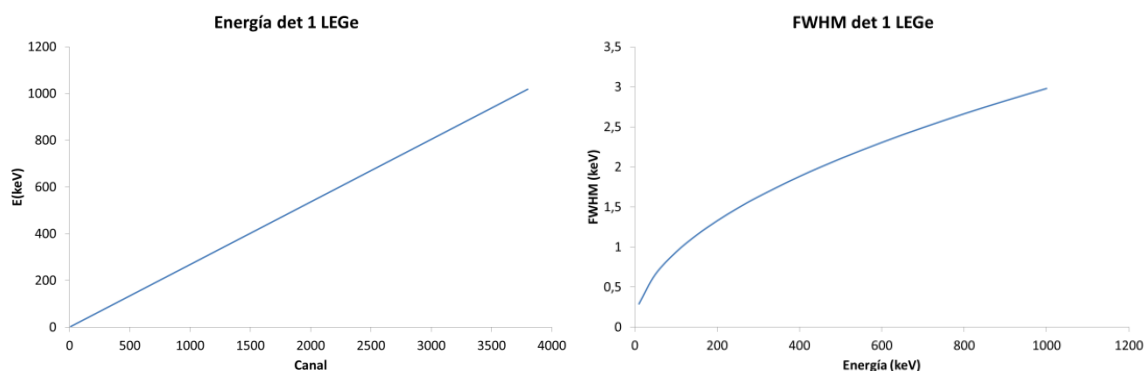


Figura 7.2: Calibración en energía y resolución del detector 1 LEGe

$$E(\text{keV}) = 0.4812 + 0.2679 \cdot \text{ch} \quad (7.1)$$

$$FWHM(\text{keV}) = -0.008226 + 0.09452 \cdot E^{1/2} \quad (7.2)$$

La calibración en energía tiene la referencia de la fecha del 22/06/2017 13:34:14.

7.5.1.2. Calibración en eficiencia de heridas LEGe

Las medidas de calibración se realizaron con el detector 1 LEGe y con el maniquí de discos de goma EVA, simuladores de heridas, las piezas se fueron colocando una sobre otra en un soporte para que la distancia entre el detector y el maniquí sea de 1 cm (ver Figura 7.3).



Figura 7.3: Calibración del detector 1 LEGe para medir emisores gamma en heridas.

Se hicieron calibraciones para tres profundidades diferentes, en superficie, con unas profundidades de 1 cm y de 1.8 cm. La geometría de calibración en profundidad se consiguió añadiendo discos blanco hasta obtener la geometría en la profundidad de la herida deseada.

Las fuentes S25447 y S25451, descritas en el apartado 7.3.2 se utilizaron para calibrar en la geometría de heridas. Se crearon los certificados de las fuentes, recogiendo la información de la energía, la intensidad de emisión y la actividad de los radionucleidos

como se muestra en la Tabla 7.1 y en la Tabla 7.2 (certificados heridas_Am241_Cs137_Co57_IRSN.CTF y heridas_Sr85_Ba133_9jun2017.CTF).

Se realizó una medida con cada fuente, en la misma geometría (centrando la fuente bajo el detector a una distancia de 1 cm). Los espectros obtenidos en cada caso se muestran en la Figura 7.4 y la Figura 7.5.

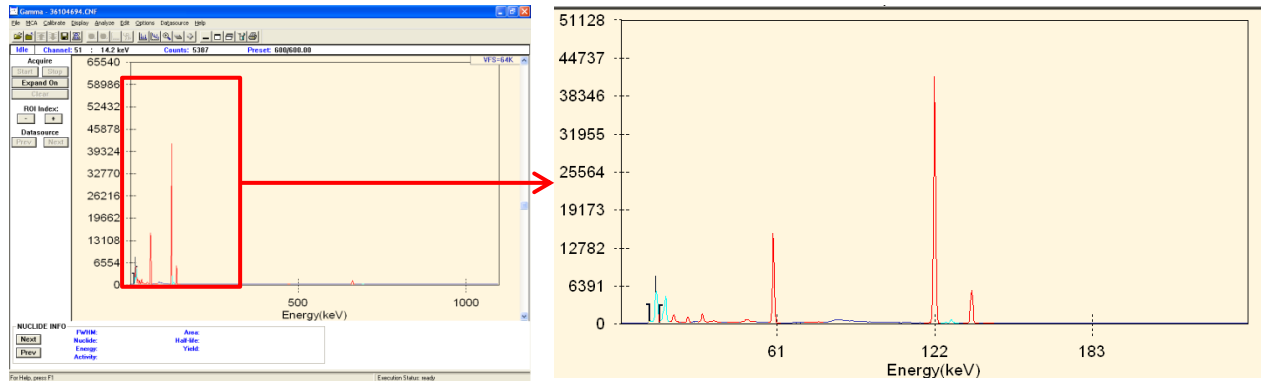


Figura 7.4: Espectro de emisores gamma heridas de ^{241}Am , ^{57}Co y ^{137}Cs con detector 1 LEGe

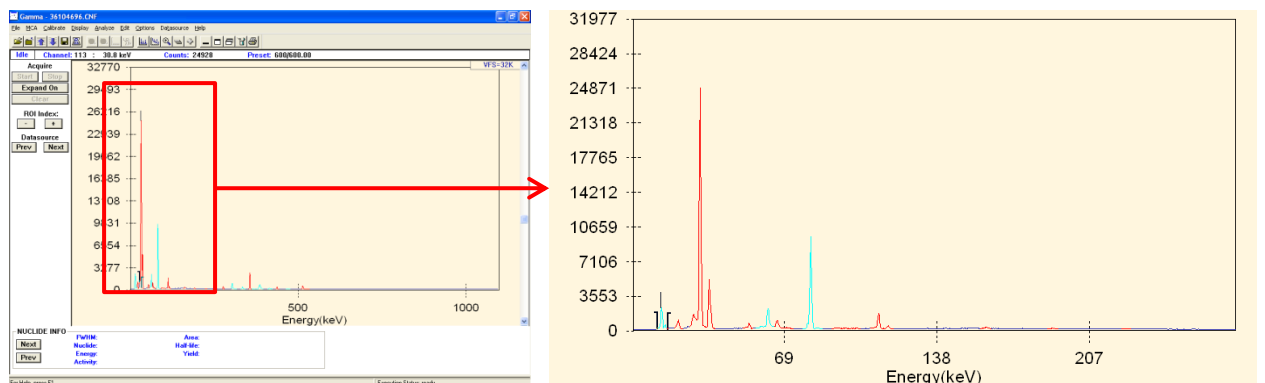


Figura 7.5: Espectro de emisores gamma heridas de ^{133}Ba y ^{85}Sr con detector 1 LEGe

El espectro resultante de la Figura 7.4 muestra las emisiones de 59.5 keV correspondiente al ^{241}Am ; 122 keV, y 136 keV de ^{57}Co ; y una emisión de 662 keV del ^{137}Cs . El espectro de la Figura 7.5 tiene el pico mayor que corresponde a la emisión de 33 keV correspondiente a RX de ^{133}Ba , a la derecha se encuentra un pico menos intenso correspondiente a 35 keV. Más a la derecha, el pico más intenso corresponde a 81 keV de radiación γ del ^{133}Ba , con picos mucho menos intensos se muestran las emisiones de 356 keV del ^{133}Ba y 514 keV del ^{85}Sr .

La calibración en eficiencia se realizó teniendo en cuenta las emisiones espectrales de las 2 medidas de las fuentes de calibración. Primero se utilizó el espectro de la Figura 7.4, a partir del certificado heridas_Am241_Cs137_Co57_IRSN.CTF, seleccionando cada centroide de cada fotopico espectral e identificándolo con la energía correspondiente a

las emisiones de los radionucleidos presentes en la primera fuente (^{241}Am , ^{57}Co y ^{137}Cs), cuyo área representa el número de cuentas originadas por los fotones incidentes de cada energía considerada, y teniendo en cuenta también la actividad (conocida) de los radionucleidos presentes en la fuente. Se calcula el valor de la eficiencia para la energía de cada pico identificado en el espectro. De igual manera, se continuó la calibración en eficiencias añadiendo las emisiones del espectro de la segunda fuente (Figura 7.5), utilizando el certificado heridas_Sr85_Ba133_9jun2017.CTF, obteniendo las eficiencias correspondientes a las emisiones del ^{85}Sr y ^{133}Ba .

Representando gráficamente las eficiencias[92, 112] de todos los picos utilizados, presentes en los espectros resultantes de las medidas de las 2 fuentes, se ajustó a una curva de calibración de eficiencia en función de la energía para la geometría de heridas con contaminación en la superficie de la piel, obteniendo la ecuación 7.3, como se muestra en la Figura 7.6. La curva de calibración de eficiencia en heridas con contaminación a una profundidad de 1 cm (ver ecuación 7.4) se muestra en la Figura 7.7 y la curva de calibración de herida con la contaminación a una profundidad de 1.8 cm es la que se ajusta a la ecuación 7.5 y se muestra en la Figura 7.8.

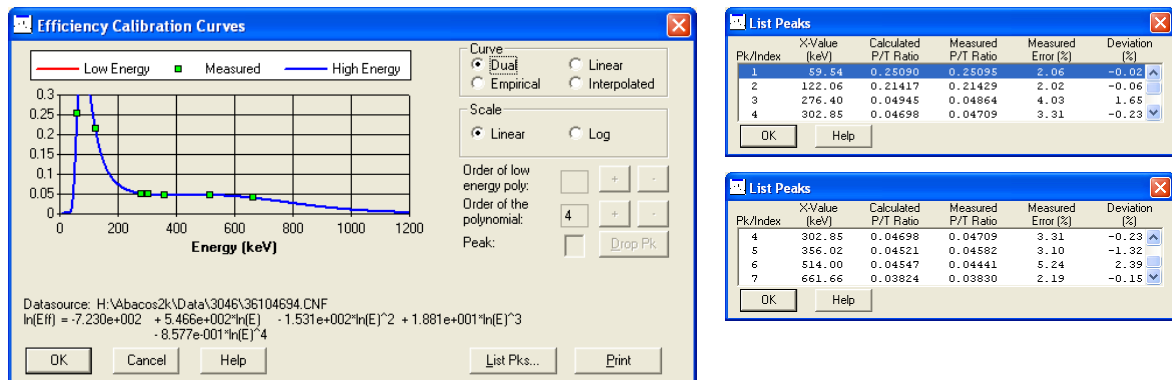


Figura 7.6: Calibración en eficiencia de heridas con contaminación en la superficie con detector 1 LEGE

$$Eff = -723 + 546.6 \cdot \ln E - 153.1 \cdot \ln E^2 + 18.81 \cdot \ln E^3 - 0.8577 \cdot \ln E^4 \quad (7.3)$$

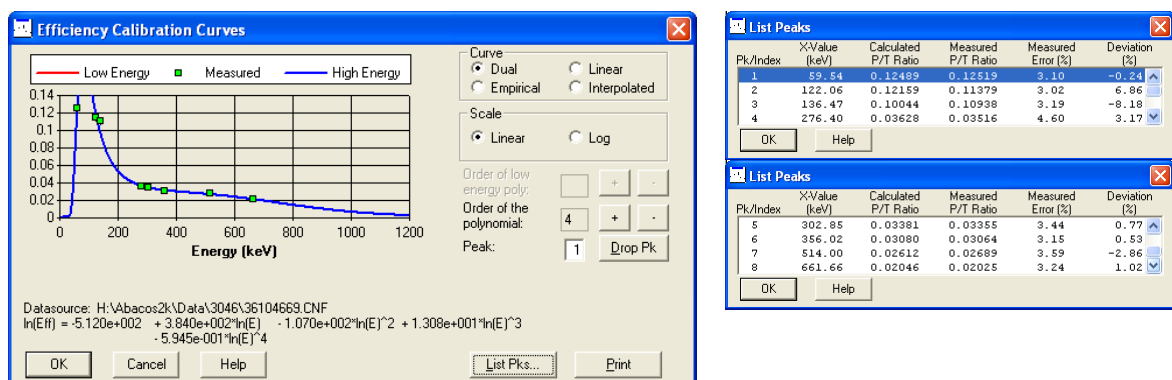


Figura 7.7: Calibración en eficiencia de heridas con contaminación en profundidad 1 cm con detector 1 LEGE

$$Eff = -512 + 384 \cdot \ln E - 107 \cdot \ln E^2 + 13.08 \cdot \ln E^3 - 0.5945 \cdot \ln E^4 \quad (7.4)$$

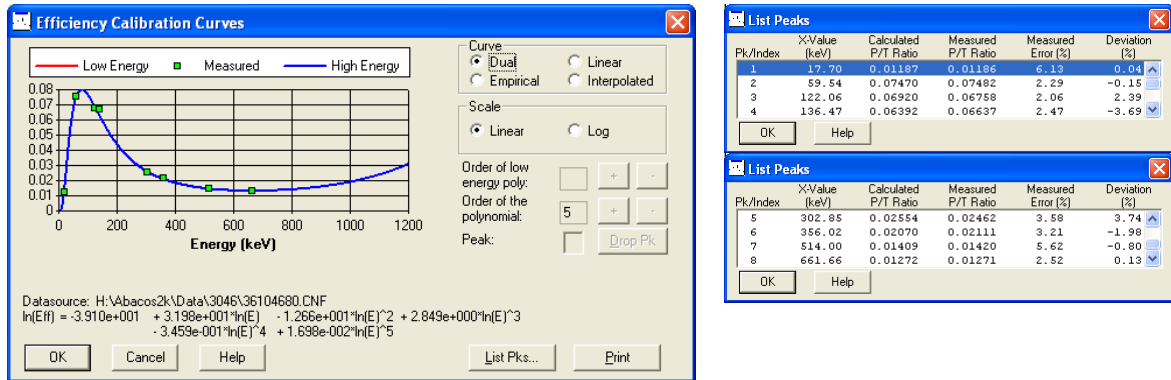


Figura 7.8: Calibración en eficiencia de heridas con contaminación en profundidad de 1.8 cm, detector LEGe

$$Eff = -391 + 31.98 \cdot \ln E - 12.66 \cdot \ln E^2 + 2.849 \cdot \ln E^3 - 0.3459 \cdot \ln E^4 + 0.01698 \cdot \ln E^5$$

(7.5)

La Figura 7.8 presenta una comparativa de las curvas de calibración en eficiencias de heridas para las diferentes profundidades en las que se encuentra la contaminación en la piel con el detector 1 LEGe.

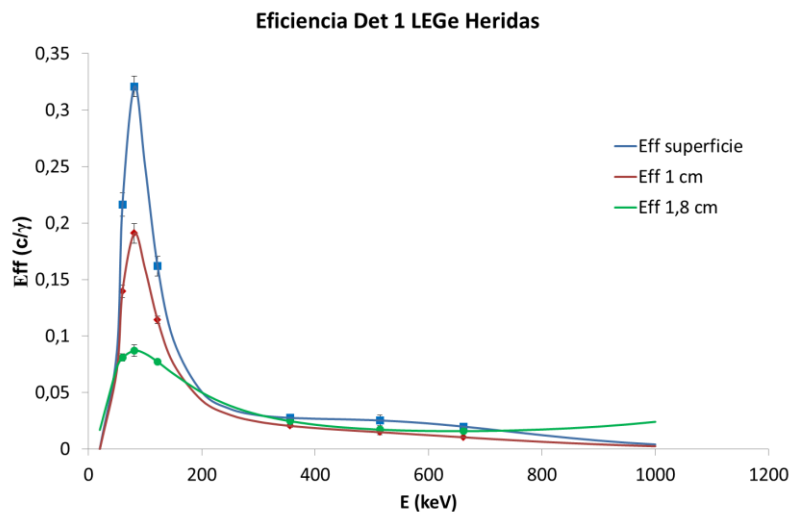


Figura 7.9: Eficiencia en función de la profundidad donde se encuentra la contaminación para las diferentes emisiones energéticas de la fuente y su comparación

Se observa en la Figura 7.9 que las calibraciones en las energías presentan variaciones significativas a distinta profundidad en el rango de bajas energías (<200 keV) debido a la autoabsorción del radionucleido en el tejido contaminado, siendo la calibración en superficie la más eficiente. Sin embargo, a partir de 200 keV las eficiencias son muy parecidas y por tanto la profundidad de la herida donde se localiza el material radiactivo no es muy influyente para radionucleidos con emisiones energéticas mayores de 200 keV.

7.5.1.3. Validación de calibración en la determinación de heridas en el detector 1 LEGe

Las validaciones de las calibraciones se realizaron con los maniqués de herida y las fuentes de referencia S25245, S25243, S25242 de ^{241}Am , ^{57}Co y ^{137}Cs , respectivamente, diferentes de las de calibración cuyas actividades se muestran en la Tabla 7.3, y fueron proporcionadas en el ejercicio de intercalibración organizado por el IRSN.

Tabla 7.3: Actividades de las fuentes utilizadas en la validación de la calibración en la fecha 6/1/2017

Ref. fuente	Radionucleido	A (Bq)
S25245	^{241}Am	970 ± 28
S25243	^{57}Co	255 ± 6
S25242	^{137}Cs	84 ± 2

Se hicieron tres medidas en las diferentes profundidades con la misma geometría que la de calibración. Fueron analizadas con sus respectivas calibraciones obteniendo las actividades que se muestran en la Tabla 7.4, Tabla 7.5 y Tabla 7.6.

Las actividades de referencia de las fuentes se calcularon por decaimiento radiactivo a la fecha de medida, para poder compararlas con las actividades medidas calculando la exactitud con la ecuación 2.5 de acuerdo a la norma ISO28218[59].

Tabla 7.4: Validación de la calibración en la superficie de la herida detector 1 LEGe

	Fichero	t (s)	FECHA	A (Bq)	ΔA (Bq)	Br	
S25245	^{241}Am	36104702.cnf	600	09/06/2017	996.8	42.0	0.0287
		36104701.cnf	600	09/06/2017	992.6	41.8	0.0243
		36104700.cnf	600	09/06/2017	996.5	42.0	0.0284
						Br	0.0271
						SBr	0.0024
S25243	^{57}Co	36104699.cnf	600	09/06/2017	174.9	9.0	0.0169
		36104698.cnf	600	09/06/2017	177.9	9.1	0.0343
		36104697.cnf	600	09/06/2017	176.0	9.0	0.0231
						Br	0.0248
						SBr	0.0088
S25242	^{137}Cs	36104705.cnf	1200	09/06/2017	85.0	4.7	0.0235
		36104704.cnf	1200	09/06/2017	84.7	4.7	0.0206
		36104703.cnf	1200	09/06/2017	87.4	5.7	0.0530
						Br	0.0324
						SBr	0.0179

Tabla 7.5: Validación de la calibración en la 1 cm de profundidad de la herida detector 1 LEGe

	Fichero	t (s)	FECHA	A (Bq)	ΔA (Bq)	Br	
S25245	²⁴¹ Am	36104678.cnf	600	07/06/2017	945.8	60.2	-0.0239
		36104677.cnf	600	07/06/2017	926.9	59.1	-0.0434
		36104670.cnf	600	07/06/2017	1035.5	65.9	0.0686
						Br	0.0004
					SBr	0.0598	
S25243	⁵⁷ Co	36104671.cnf	600	07/06/2017	162.4	9.4	-0.0612
		36104675.cnf	600	07/06/2017	156.8	9.1	-0.0936
		36104676.cnf	600	07/06/2017	155.9	9.3	-0.0988
						Br	-0.0845
					SBr	0.0204	
S25242	¹³⁷ Cs	36104705.cnf	600	07/06/2017	85.7	8.0	0.0325
		36104673.cnf	600	07/06/2017	85.4	8.0	0.0294
		36104674.cnf	600	07/06/2017	87.6	8.1	0.0554
						Br	0.0391
					SBr	0.0142	

Tabla 7.6: Validación de la calibración en la 1.8 cm de profundidad de la herida detector 1 LEGe

	Fichero	t (s)	FECHA	A (Bq)	ΔA (Bq)	Br	
S25245	²⁴¹ Am	36104684.cnf	600	08/06/2017	996.9	49.5	0.0288
		36104685.cnf	600	08/06/2017	992.7	49.3	0.0245
		36104686.cnf	600	08/06/2017	1002.0	49.6	0.0341
						Br	0.0291
					SBr	0.0048	
S25243	⁵⁷ Co	36104690.cnf	600	08/06/2017	176.4	9.1	0.0194
		36104691.cnf	600	08/06/2017	175.7	9.2	0.0158
		36104692.cnf	600	08/06/2017	179.4	9.1	0.0368
						Br	0.0240
					SBr	0.0112	
S25242	¹³⁷ Cs	36104687.cnf	600	08/06/2017	76.5	8.1	-0.0781
		36104688.cnf	1200	08/06/2017	79.6	6.4	-0.0412
		36104689.cnf	1200	08/06/2017	82.6	6.6	-0.0047
						Br	-0.0413
					SBr	0.0367	

Los resultados de exactitud (Tabla 7.4, Tabla 7.5 y Tabla 7.6), en la superficie de la herida, son menores de 0.03 en todos los casos (3 % de desviación de la actividad medida respecto a la actividad de referencia). Para la localización de la contaminación a la profundidad de 1 cm la exactitud es de 0.0004 para ²⁴¹Am, -0.09 para ⁵⁷Co y -0.04 para ¹³⁷Cs. Finalmente para la profundidad de 1.8 cm la exactitud es de 0.03, -0.03 y -0.04 para ²⁴¹Am, ⁵⁷Co y ¹³⁷Cs respectivamente.

La precisión está calculada por la ecuación 2.7, para la superficie de la piel son 0.003, 0.009 y 0.02, para ²⁴¹Am, ⁵⁷Co y ¹³⁷Cs respectivamente, para la profundidad de 1 cm la precisión es de 0.06, 0.02 y 0.02, y para la profundidad de 1.8 cm la precisión es de 0.005, 0.01 y 0.04 para ²⁴¹Am, ⁵⁷Co y ¹³⁷Cs respectivamente. En todos los casos se cumplen los criterios de aceptación según la norma ISO 28218[59] ($-0.25 < Br < 0.5$ y $SBr < 0.4$), y se han presentado en la Figura 7.10.

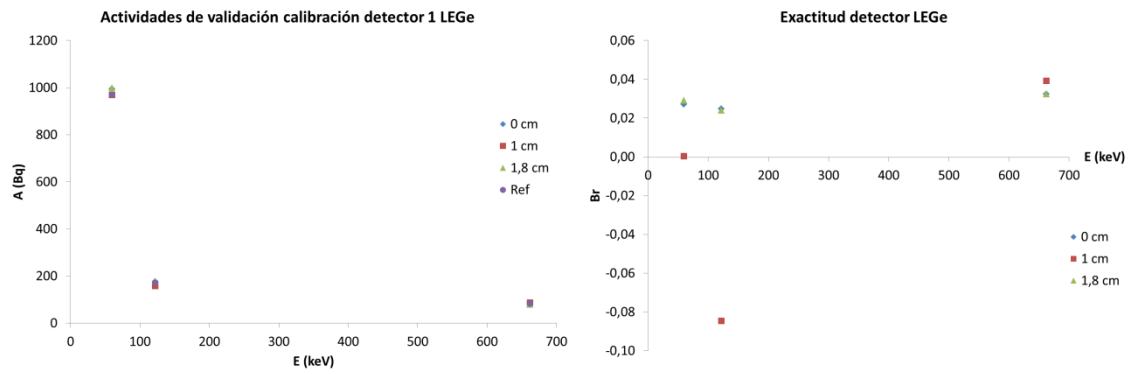


Figura 7.10: Actividades y exactitud de la validación de calibración de heridas en el detector 1 LGE

7.5.2. Estudio de la eficiencia en función de la profundidad

Las eficiencias calculadas se representan en función de la profundidad de la herida para las energías de 59.5 keV, 122 keV, 356 keV, 514 keV y 662 keV (Figura 7.11) obteniendo una serie de puntos que se pueden ajustar a una regresión lineal en cada caso, y son las que se muestran en las ecuaciones 7.6-7.10.

Las ecuaciones de la eficiencia en función de la profundidad de la contaminación en la herida permiten calcular la eficiencia para cualquier profundidad donde se encuentre el material radiactivo en la herida entre la superficie de la piel y 1.8 cm de profundidad y utilizarla así en el cálculo de la actividad de los emisores gamma con emisiones en las energías propuestas.

$$Eff(59.5 \text{ keV}) = -0.099 \cdot h(\text{cm}) + 0.2431 \quad (7.6)$$

$$Eff(122 \text{ keV}) = -0.0432 \cdot h(\text{cm}) + 0.15 \quad (7.7)$$

$$Eff(356 \text{ keV}) = -0.0135 \cdot h(\text{cm}) + 0.0447 \quad (7.8)$$

$$Eff(514 \text{ keV}) = -0.0144 \cdot h(\text{cm}) + 0.0372 \quad (7.9)$$

$$Eff(662 \text{ keV}) = -0.0073 \cdot h(\text{cm}) + 0.0205 \quad (7.10)$$

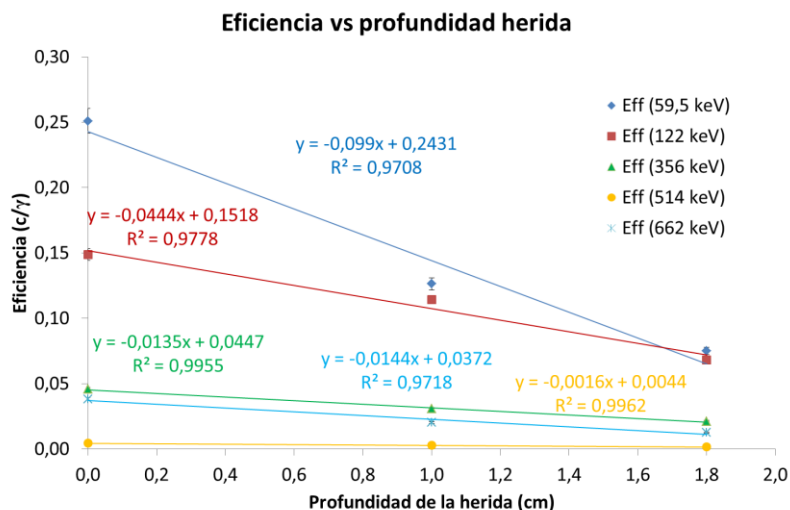


Figura 7.11: Eficiencia en función de la profundidad para diferentes energía

7.6. Límite de detección de heridas

Se realizó una medida de blanco (Figura 7.12) en la misma geometría que la de calibración y se analizó en el sistema LEGe con la eficiencia calculada, para los radionucleidos ²⁴¹Am, ⁵⁷Co, ¹³³Ba, ⁸⁵Sr y ¹³⁷Cs y los resultados del límite de detección para cada radionucleido se muestran en la Tabla 7.7.



Figura 7.12: Medida blanco de herida en el detector 1 del sistema LEGe.

Tabla 7.7: Límites de detección de emisores γ en heridas para un tiempo de medida de 10 min con el detector 1 del sistema LEGe.

Límite de detección (Bq) para heridas en el detector 1 LEGe, tiempo de medida 600 s.					
Profundidad de herida (cm)	LD(Bq) ²⁴¹ Am	LD(Bq) ⁵⁷ Co	LD(Bq) ¹³³ Ba	LD(Bq) ⁸⁵ Sr	LD(Bq) ¹³⁷ Cs
Superficie	0.32	0.13	0.24	0.64	0.48
1	0.52	0.23	0.52	1.1	0.89
1.8	1.1	0.40	1.2	2.1	0.14

Los límites de detección para los 5 radionucleidos considerados en una medida de 10 minutos están alrededor de 1 Bq, para todas las profundidades calibradas.

Este método y resultados ha sido expuesto como ponencias *CIEMAT WBC capabilities for responding in case of nuclear and radiological emergencies*[92] en el ICDA- de Lisboa 2019 y como *Validación del nuevo procedimiento de calibración y medida de la contaminación en heridas en emergencias. Resultados del laboratorio del CRC (CIEMAT) en campaña internacional de intercomparación* en el 6º Congreso de la SEFM y SEPR de Burgos 2019.

7.7. Incertidumbres

Las incertidumbres de las actividades de emisores γ en heridas tienen en cuenta los factores que influyen en la medida de tipo A, según se explica en el apartado 2.6. Las fuentes de incertidumbre tipo B, tales como las variaciones del posicionamiento del detector, las dimensiones corporales, los materiales, la señal de fondo, la propia calibración y el análisis espectral están valoradas según la norma ISO 27048[8].

7.8. Conclusiones de medida de emisores gamma en heridas

Las conclusiones de la medida de emisores gamma en heridas se muestran a continuación:

1. El laboratorio del CRC ha desarrollado una nueva técnica de medida de contaminación interna vía heridas gracias a una colaboración con el IRSN (Francia), suministrador del maniquí de calibración (actividad conocida) y de validación (actividad desconocida). Esta nueva capacidad del laboratorio es relevante tanto en caso de medidas de trabajadores (aplicación más probable) como de miembros del público.
2. El detector 1 del sistema LEGe es muy adecuado para medir contaminantes depositados en heridas emisores de RX y radiación γ .
3. La eficiencia de detección de la contaminación en heridas con el detector 1 LEGe varía en función de la profundidad de la contaminación de la herida y en función de la energía. La variación de la eficiencia en función de la profundidad de la contaminación se ajusta a una regresión lineal de forma que se puede obtener la eficiencia en diferentes profundidades de contaminación para las energías típicas de los radionucleidos de este estudio. Para calibraciones en superficie las eficiencias son mayores que para contaminaciones más profundas.

4. Los límites de detección en heridas para medidas de actividad de 10 minutos con un detector LEGe están en torno a 1 Bq. Dada la excelente resolución de este equipo se pueden identificar, distinguir y cuantificar en términos de actividad los radionucleidos contaminantes emisores de energías muy próximas.

Conclusiones generales

El presente trabajo de Tesis Doctoral desarrolla varias líneas de actividad, todas ellas conducentes a la implementación práctica de métodos *in vivo* para la medida de contaminación interna en personas expuestas en emergencias radiológicas y nucleares.

En cada capítulo hay un apartado donde se muestran sus propias conclusiones. No obstante, las conclusiones generales que se han producido en esta tesis se resumen a continuación:

1. Los laboratorios de Contador de Radiactividad Corporal (CRC) disponen en general de maniqués de calibración para la medida del hombre adulto porque su principal aplicación es la determinación de la exposición interna en trabajadores expuestos, pero en general no se dispone de fuentes patrón para la calibración y medida de población infantil contaminada. En el CRC-CIEMAT, gracias al trabajo de esta tesis doctoral, se han ampliado las capacidades mediante el desarrollo de maniqués de diferentes edades (1, 5, 10, 15 años) y mujer, como en el caso de ^{131}I en tiroides y de contaminantes emisores gamma distribuidos en cuerpo entero. Además se ha podido realizar la calibración de americio en cráneo para niños gracias a un ejercicio de intercomparación organizado por el grupo EURADOS.
2. En esta tesis se han desarrollado también métodos de medida *in vivo* para determinación de plutonio en pulmón y de emisores gamma en heridas. Se trata de metodologías únicas en España que permiten asegurar la dosimetría interna en situaciones especiales, en caso de alto nivel de contaminación de ^{239}Pu vía inhalación y de incorporación de contaminantes internos a través de lesiones en la piel.
3. Los equipos de detección utilizados en la tesis son el contador Fastscan (dos detectores NaI(Tl)) y el sistema de detectores de semiconductor de germanio LEGe, ambos muy adecuados para su aplicación en situaciones de emergencia.
4. Todas las calibraciones implementadas se han validado con maniqués diferentes a los de calibración y se pueden utilizar en casos de emergencias nucleares y radiológicas.
5. En relación a la calibración y medida de ^{131}I en tiroides resaltar que los maniqués de cuello de diferentes tamaños han sido diseñados en este trabajo y fabricados en el CIEMAT. El caso de las configuraciones de 5 y 10 años se han validado en el marco

del proyecto europeo OPERRA (Project number 604984) Child and Adult Thyroid Monitoring After Reactor Accident (CATHYMARA).

6. En general, las calibraciones en eficiencias dependen del posicionamiento y distancia del maniquí-detector. En el contador Fastscan influye también la altura del maniquí o persona objeto de estudio.
7. Las eficiencias son mayores para los maniquíes más pequeños. En los casos de las calibraciones de ^{131}I en tiroides y de emisores gamma en todo el organismo, existe similitud de las curvas de eficiencias entre las configuraciones de adultos y de jóvenes de 15 años. Sin embargo, se muestra más diferencia con los casos de 1 y 5 años. De igual forma, en el cráneo resulta más eficiente la configuración de niño que en la de hombre adulto.
8. Las eficiencias del pulmón son menores para los espesores torácicos mayores y en el caso de las heridas son más eficientes cuanto más superficiales se encuentren los contaminantes.
9. La selección de la técnica más adecuada en una emergencia depende de los radionucleidos emitidos teniendo en cuenta sus energías RX y gamma de emisión y sus órganos de afinidad una vez incorporados en el organismo humano.
10. En general, lo más conveniente es realizar una medida en el contador Fastscan, con 5 minutos de medida, que permite valorar rápidamente contaminaciones de emisiones gamma en tiroides y en todo el organismo, además de servir de cribado. Por otro lado, en caso de contaminaciones complejas de emisores de rayos X y gamma de baja energía, como actínidos en pulmón, lo más adecuado es utilizar el sistema de detección LEGe, ubicado en el interior de una cámara de bajo fondo radiactivo (paredes de acero prenuclear) única en España.
11. Los métodos desarrollados en esta tesis pueden utilizarse en caso de emergencia nuclear y radiológica. Todos aportan resultados de actividad (Bq) retenida en el organismo, que permite una valoración de la dosis efectiva comprometida, $E(50)$ [mSv], por exposición interna por debajo del límite establecido para el público en la publicación ICRP 103 de 1 mSv/año, exceptuando el plutonio en pulmón y el americio en cráneo, en el que sólo se detectan los casos con actividades altas, en contaminaciones internas severas y se pueden utilizar para dar una respuesta rápida en emergencia. El método de estimación de la dosis $E(50)$ a partir de la actividad medida en el organismo viene descrito en la introducción del Capítulo 1 (ecuaciones

1.6 y 1.7). Generalmente, la exposición interna por actínidos se realiza con medidas de bioensayos en excretas de los individuos afectados, con el agravante que pueden tardar varios días o incluso semanas en obtener resultados.

Líneas Futuras de Investigación

Las futuras líneas de investigación incluirán maniqués más adecuados para la población; teniendo en cuenta las dimensiones de los órganos específicos y de todo el organismo en diferentes edades y para mujeres. Los componentes de los maniqués utilizados como simuladores pueden ser mejorados con novedosos materiales que simulen las propiedades de los tejidos y órganos humanos.

Utilizar otros detectores de mejor resolución que los detectores tipo NaI(Tl) y más eficiencia que los detectores de tipo LEGe, que permitan realizar trabajos en campo en caso de una emergencia nuclear o radiológica.

Participar en intercomparaciones e intercalibraciones internacionales permiten al laboratorio del CRC del CIEMAT poder implementar y validar nuevas técnicas de métodos *in vivo* para la medida de la población (niños y adultos) en emergencias.

Publicaciones, proyectos y presentaciones relacionados con esta tesis

Publicaciones

B. Perez López, J. F. Navarro, M. A. López Ponte. Methodology at Ciemat Whole Body Counter for *in vivo* monitoring of radioiodine in the thyroid of exposed population in case of nuclear emergency. Radiation Protection Dosimetry. 2018 Dec 1;182(2):171-176. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy045>

B. Perez López, J. F. Navarro, M. A. López Ponte, P. Nogueira. Efficiency study of a LEGe detector system for the assessment of ²⁴¹Am in skull at CIEMAT Whole Body Counter. Radiation Protection Dosimetry. (2016), Vol. 170, No. 1–4, pp. 231–236. DOI: 10.1093/rpd/ncv404

P. Nogueira, W. Rühm, M.A. Lopez, T. Vrba, W. Buchholz, P. Fojtík, G. Etherington, D. Broggio, J. Huikari, O. Marzocchi, T. Lynch k, A.L. Lebacq, C. Li, J. Osko, I. Malatova, D. Franck, B. Breustedt, D. Leone, J. Scott, A. Shutt, B. Hauck, K. Capello, **B. Perez-Lopez**, J.F. Navarro-Amaro, T. Pliszczyński, K. Fantínova, S.Y. Tolmachev. EURADOS ²⁴¹Am skull measurement intercomparison. Radiation Measurements 82 (2015) 64-73. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.07.011>

Proyectos

Título del proyecto: **Child and Adult Thyroid Monitoring after Reactor Accident (CATHYMARA)** nº de proyecto 604984. Entidad financiadora: Comisión Europea. Duración: Enero 2016-Junio 2017.

- M. Isaksson, P. Fojtík, J. F. Navarro, J. Oško, **B. Perez**. OPERRA Deliverable D5.26. CATHYMARA report: *Report of WP4 about inter-comparison results for non-trained responders. Publicación del informe del grupo de trabajo WP4 del Proyecto Child and Adult Thyroid Monitoring after Reactor Accident (Cathymara) nº de proyecto 604984.*
- D. Broggio, S. Baudé, A. Belchior, V. Berkovskyy, Y. Bonchuck, J. Dewoghélaëre, G. Etherington, P. Fojtík, D. Franck, J.M. Gomez-Ros, D. Gregoratto, J. Helebrant, G. Hériard Dubreuil, J. Hůlka, M. Isaksson, A. Kocsonya, A.-L. Lebacq, I. Likhtarev, P. Lombardo, M.A. Lopez, I. Malátová, J.W. Marsh, I. Mitu, O. Monteiro Gil, M. Moraleda, J.F. Navarro, J. Oško, A. Pántya, T. Pázmándi, **B. Perez**, V. Pospisil, G. Ratia, M.-A. Saizu, P. Szántó, P. Teles, K. Tymińska, F. Vanhavere, P. Vaz, T. Vrba, I. Vu, M. Youngman, P. Zagyvai *Child and adult thyroid monitoring after a reactor accident (CATHYMARA): Technical recommendations and remaining gaps.* Radiation Measurements. Febrero 2019

- Mats Isaksson, David Broggio, Pavel Fojtík, Anne Laure Lebacqz, Juan Francisco Navarro Amaro, Jakub Oško, **Begoña Pérez López**, Isabelle Vu, Paolo Battisti, Jimmy Börjesson, Marie Carlsson, Carlo Maria Castellani, Magnus Gårdestig, Peter Hill, Grażyna Krajewska, Günter Lünendonk, Oliver Meisenberg, Mats Stenström, Sokratis El Mantani Ordoulidis. *Assessing ^{131}I in thyroid by non-spectroscopic instruments - A European intercomparison exercise*. Radiation Measurements. Abril 2019

Presentaciones en Congresos

6º Congreso Conjunto 21 SEFM/16 SEPR (Burgos, 11- 14 de junio 2019)

- **Begoña Pérez López**, Juan Francisco Navarro Amaro, María Antonia López Ponte, Teresa Navarro Bravo. *Calibración de CRC para medida de radioyodo en tiroides del público expuesto*. ISBN: 978-84-697-4064-4; ID: 01016.
- Juan Francisco Navarro Amaro, **Begoña Pérez López**, María Antonia López Ponte, Teresa Navarro Bravo. *Nueva metodología de medida de ^{131}I en tiroides con gammacámara para población expuesta en emergencias*. ISBN: 978-84-697-4064-4; ID: 01054.

ICDA -3 "The 3rd International Conference on Dosimetry and its Applications". Lisboa 27-31 mayo 2019

- **B. Pérez López**, J.F. Navarro, M.A. López. *CIEMAT WBC capabilities for responding in case of nuclear and radiological emergencies*.
- J.F. Navarro, **B. Pérez López**, M.A. López. *Calibration of a SPECT/CT gamma camera with child and adult thyroid neck phantoms for in vivo monitoring of exposed population in case of nuclear emergency*.

5º Congreso Conjunto 21 SEFM/16 SEPR (Girona, 13- 16 de junio 2017)

- **Begoña Pérez López**, Juan Francisco Navarro Amaro, María Antonia López Ponte, Teresa Navarro Bravo. *Calibración de CRC para medida de radioyodo en tiroides del público expuesto*. ISBN: 978-84-697-4064-4; ID: 01016.
- Juan Francisco Navarro Amaro, **Begoña Pérez López**, María Antonia López Ponte, Teresa Navarro Bravo. *Nueva metodología de medida de ^{131}I en tiroides con gammacámara para población expuesta en emergencias*. ISBN: 978-84-697-4064-4; ID: 01054.

IV Congreso Conjunto de la Sociedad Española de Física Médica y la Sociedad Española de Protección Radiológica. (Valencia, 23- 26 de junio 2015)

- **B. Pérez López**, J. F. Navarro, D. Pérez, M. A. López. *Estudio de eficiencia de detección de ^{131}I en diferentes tamaños de tiroides: aplicación en emergencias*. ISBN: 978-84-943642-4-2

- J.F. Navarro Amaro, **B. Pérez López**, M^a. A. López Ponte. *Calibración y medida in vivo de ^{239}Pu en pulmón. Respuesta rápida en situaciones de emergencia*. ISBN: 978-84-943642-4-2
- M. Moraleda, J.M. Gomez-Ros, M.A. López, **B. Pérez**, J. F. Navarro. *Incertidumbres asociadas a la determinación in-vivo de ^{131}I en tiroides*. ISBN: 978-84-943642-4-2

International Conference on Individual Monitoring of Ionising Radiation, IM 2015. (April 20-24, 2015 Bruges, Belgium)

B. Pérez López, J. F. Navarro, M. A. López Ponte, P. Nogueira. *In vivo Calibration of a LEGe detection system for assessment of Americium 241 in skull in whole Body Counter of CIEMAT*.

40^o Congreso de la SNE (Valencia octubre 2014)

Pérez López, Begoña. *Determinación de Am-241 en Determinación de Am-241 en pulmón y hueso por espectrometría gamma con detectores de semiconductor LEGe*. Finalista al Premio SNE a trabajos, proyectos y tesinas de 2014.

Referencias bibliográficas

1. FN, *RESULTADOS NUCLEARES DE 2016 y perspectivas de futuro*, F. Nuclear, Editor. 2017, Foro de la Industria Nuclear Española: Madrid. p. 118.
2. (CSN), C.d.S.N. 13/08/2018]; Available from: <http://www.csn.es>.
3. ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60*. 1991
4. ICRP, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP 103. Ann. ICRP 37 (2-4)*. 2007.
5. ICRP, *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.)*. 2012.
6. ICRP, *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25 (3-4)*. 1995.
7. ICRP, *Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. ICRP Publication 78. Ann. ICRP 27 (3-4)*. 1997.
8. ISO, *ISO 27048: Radiation protection - Dose assessment for the monitoring of workers for internal radiation exposure*. 2011.
9. IAEA, *INES- Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos*.
10. UNESA. *Central nuclear*. Available from: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1349-central-nuclear>.
11. IAEA, *Enseñanzas extraídas de la respuesta a emergencias radiológicas (1945–2010)*. 2014, IAEA: Viena.
12. Kemeny, J., *President's Commission: Reports of The Public Health and Safety Task Force*. 1979, Government Printing Office: Washington DC.
13. IAEA, *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*, in *Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment"*. 2006: Vienna.
14. UN, *Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly)*, in *UNSCEAR 2008 REPORT. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, U. Nations, Editor. 2011: New York.
15. UNSCEAR, *Annex J: Exposures and effects of the Chernobyl accident* UNSCEAR 2000 REPORT 2000. **Vol. II**: p. 115
16. Kutkov, V.A., Z.S. Arefieva, Yu., B. Muravev et al., *Unique form of airborne radioactivity: Nuclear fuel 'hot particles' released during the Chernobyl accident*. International Atomic Energy Agency (IAEA), 1995(International symposium on environmental impact of radioactive releases): p. 6.
17. Likhtariov, I.A., V.S. Repin, O.A. Bondarenko et al., *Radiological effects after inhalation of highly radioactive fuel particles produced by the Chernobyl accident*. Radiation Protection Dosimetry, 1995. **59**: p. 242-254.
18. Drozdovitch, V., et al., *RECONSTRUCTION OF RADIATION DOSES IN A CASE-CONTROL STUDY OF THYROID CANCER FOLLOWING THE CHERNOBYL ACCIDENT*. Health physics, 2010. **99**(1): p. 1-16.
19. IAEA, *The Fukushima Daiichi Accident*. 2015, Vienna: International Atomic Energy Agency.
20. Gonzalez, A.J., *Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident*, J.D.B.J. Makoto Akashi, Masamichi Chino, Toshimitsu Homma, Nobuhito Ishigure, Michiaki Kai, Shizuyo Kusumi, Jai-Ki Lee, Hans-Georg Menzel, Ohtsura Niwa, Kazuo Sakai, Wolfgang Weiss, Shunichi Yamashita and Yoshiharu Yonekura, Editor. 2013, JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION.
21. WHO, *Health Risk Assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation*, W.H. Organization, Editor. 2013, WHO: Geneva.
22. UN, *UNSCEAR 2013 Report: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly)*. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, in *Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami* U. Nations., Editor. 2014: New York.
23. Lopez, M.A., et al., *Lessons learned from the EURADOS survey on individual monitoring data and internal dose assessments of foreigners exposed in Japan following the Fukushima Daiichi NPP accident*. Radiation Protection Dosimetry, 2016. **170**(1-4): p. 402-406.
24. CSN. *Accidente de la central nuclear de Vandellós I*. 2017 03/04/2017 24/28/2018]; Available from: <https://energia-nuclear.net/accidentes-nucleares/vandellos-i.html>.
25. CSN, *SUCESO DE LIBERACIÓN DE PARTÍCULAS RADIATIVAS EN C.N. ASCÓ I. DESCRIPCIÓN Y CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS*.
26. ISO, *ISO 16637: Radiological protection-Monitoring and internal dosimetry for staff members exposed to medical radionuclides as unsealed sources*. 2016.
27. Álvarez, A., *Urinary excretion measurements after accidental inhalation of ^{99m}Tc and ⁹⁹Mo*, N. Navarro, Salvador, S, Editor. 1994, Radiation Protection Dosimetry. p. 59-61.
28. ICRP, *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107*. . 2008.
29. ForoNuclear. *Etapas para la obtención del combustible nuclear a partir del uranio*. 14/08/2018]; Available from: <https://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/120445-etapas-para-la-obtencion-del-combustible-nuclear-a-partir-del-uranio>.
30. IAEA, *Significant incidents in nuclear fuel cycle facilities* 1996, IAEA: Vienna.

31. ASN. *Contamination interne d'un salarié d'une entreprise sous-traitante*. 25/02/2010 [cited 2018 15 febrero 2018]; Available from: <https://www.asn.fr/Controler/Actualites-du-controler/Avis-d-incident-des-installations-nucleaires/Contamination-interne-d-un-salarie-d-une-entreprise-sous-traitante>.
32. Powell, D., *The Semipalatinsk Legacy*. 2014: Submitted as coursework for PH241, Stanford University.
33. Semioshkina, N., *An Overview on GSF Activities at the Semipalatinsk Test Site, Kazakhstan*. p. A95.
34. Grosche, B., *Studies of Health Effects from Nuclear Testing near the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan*. Central Asian Journal of Global Health, (1): p. 127.
35. Harrison, J., et al., - *The polonium-210 poisoning of Mr Alexander Litvinenko*. - Journal of Radiological Protection, (- 1): p. - 266.
36. Energy, E.C.-D.G.f., *VERIFICATIONS UNDER THE TERMS OF ARTICLE 35 OF THE EURATOM TREATY- Plutonium contaminated sites in the PALOMARES region SPAIN*. 2010, European Commission.
37. CSN, *INFORME RESPUESTA A LA PREGUNTA FORMULADA POR D. JUAN ANTONIO LÓPEZ DE URALDE, REPRESENTANTE DE LA ASOCIACIÓN GREENPEACE SOBRE EL ACCIDENTE DE ACERINOX DE 1998*. 2001.
38. CSN, *Emergencia en centrales nucleares*. 2009.
39. T. Vrba, V.B., G. Ratia, Y. Bonchuk, D. Broggio, P. and D.G. Teles, M A Lopez, *CATHyMARA report: Report of WP6 about dose assessment tools and associated demonstration software. OPERRA Deliverable D5.28*. 2018.
40. ICRP, *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). 1994.
41. ICRP, *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*. ICRP Publication 30 (Part 1). Ann. ICRP 2. 1979.
42. ICRP, *Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36 (1-2). 2006.
43. NCRP, *Report No 156: Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment*. 2007.
44. IAEA, *Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides. Safety guide N° RS-G-1.2*. 1999.
45. Etherington, G., et al., *TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR MONITORING INDIVIDUALS FOR OCCUPATIONAL INTAKES OF RADIONUCLIDES*, in *Radiation Protection N° 188*, Energy, Editor. 2018, European Commission: Luxembourg.
46. ICRU, *Direct Determination of the Body Content of Radionuclides (Report 69)*. 2003.
47. ISO, *Radiological protection — Monitoring and internal dosimetry for staff members exposed to medical radionuclides as unsealed sources*. ISO 16637. 2016.
48. Palmer, H.E., *A shadow shield whole-body counter*. Health Physics, 1964.
49. Fernández Sánchez- Castro, M., *Informe sobre el sistema de ventilación y acondicionamiento térmico del contador de cuerpo entero*. 1991.
50. Canberra, *Manual Low Energy Germanium Detectors*. 1997.
51. CIEMAT, *Curso de capacitación para supervisores de instalaciones radiactivas*. 2008.
52. Canberra, *Manual Fastscan Counter*. 2004.
53. Canberra, *Manual Genie/ Abacos 2000*. 1999.
54. Gilmore, G.R., *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2008, John Wiley & Sons: West Sussex, England.
55. CIEMAT, *Curso sobre Espectrometría gamma avanzada*, CIEMAT, Editor. 2010.
56. ICRP, *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values*. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32 (3-4). 2002.
57. WHO, *The WHO Child Growth Standards*, W.H. Organization, Editor. 2015.
58. White, D.R., et al., *ICRU Report 44: Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurements*. Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements, 2016. **os23**(1): p. NP-NP.
59. ISO, *ISO 28218: Radiation protection - Performance criteria for radiobioassay*, ISO, Editor. 2010. p. 45.
60. Pérez, C., *Umbral de Decisión y Límite de Detección en Medidas Espectrométricas. Parte 1: Aplicación a la Espectrometría Gamma*, C. Gascó and M.A. López, Editors. 2010, CIEMAT.
61. ISO, *ISO 11929. Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation. Fundamentals and application*. 2010.
62. Pérez López, B. and J.F. Navarro Amaro, *Estudio LD y UD. Medida In Vivo de emisores gamma en el Laboratorio del CRC. Año 2011*, in *CIEMAT/DR/DPI/10/2011*. 2011, CIEMAT.
63. Perez, C., C. Gascó, and M.A. López, *Umbral de decisión y límite de detección en medidas espectrométricas. Parte 1: Aplicación a la espectrometría gamma*. 2010.
64. Navarro Amaro, J.F., Pérez López, B, *Fuentes de Incertidumbre en la medida directa de la contaminación interna en el laboratorio del Contador de Radiactividad Corporal del CIEMAT CIEMAT/DR/DPI/01/2011*. 2018.
65. Canberra, *Manual Genie2000-Abacos2000*. 1999.
66. Castellani, C.M., Marsh, J.W., Hurtgen, C., Blanchardon, E., Berard, P., Giussani, A., Lopez, M.A., *IDEAS Guidelines (Version 2) for the estimation of committed doses from incorporation monitoring data. Work of Task 7.1 "Update of IDEAS Guidelines and Databases" of EURADOS WG7 "Internal Dosimetry"*. 2013, EURADOS: Braunschweig. p. 192.
67. Ramin Javan, M.D. *Thyroid ultrasound top 10 pathology*. 2013; Available from: https://www.med-ed.virginia.edu/courses/rad/Thyroid_Ultrasound/01intro/intro-01-02.html.
68. Dorion, D., *Thyroid Anatomy*. 2015.

69. León, A., *La glándula tiroidea normal: Anatomía*, J.J. Milita Petric, Angelica Silva, Douglas Arbulo, Editor.
70. Tortora, G.J. and B. Derrickson, *Principios de Anatomía y Fisiología*. 13 ed. 2013. 1300.
71. ICRP, *Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3*.
72. ICRP, *Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2)*. 2015.
73. ICRP, *ICRP 137. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3*. 2017.
74. BIODEX Medical Systems, I., *Thyroid uptake neck phantom*.
75. American National Standards Institute, I., *ANSI/HPS N13.44-2014. Thyroid Phantom Used in Occupational Monitoring*. 2014.
76. Institute, A.N.S., *Thyroid radioiodine uptake measurements using a neck phantom*. 1973 (R 1984): New York.
77. Kramer, G.H., et al., *Comparison of the ANSI, RSD, KKH, and BRMD thyroid-neck phantoms for 125I thyroid monitoring*. Health Phys, 1996. **70**(3): p. 425-9.
78. Navarro, J., B. Pérez López, and M. López, *Análisis de Resultados Intercomparación organizada por el IRSN (2014) para la medida de radioyodo en tiroides*, in CIEMAT/DR/DPI/10/2015. 2015, CIEMAT.
79. <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>. *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest*. [cited 2015].
80. Pérez López B., N., J.F., López, M.A, *Methodology at Ciemat Whole Body Counter for in Vivo Monitoring of Radioiodine in the Thyroid of Exposed Population in Case of Nuclear Emergency*. Raditation Protection Dosimetry, 2018: p. 1-6.
81. Huelke, D.F., *An Overview of Anatomical Considerations of Infants and Children in the Adult World of Automobile Safety Design*. Annu Proc Assoc Adv Automot Med., 1998. **42**.
82. Kramer, G.H., et al., *The BRMD thyroid-neck phantom: design and construction*. Health Phys, 1996. **71**(2): p. 211-4.
83. S.Y.F. Chu, L.P.E., R.B. Firestone, *The Lund/LBNL Nuclear Data Search*, B. LBNL, USA and L.U. Department of Physics, Sweden, Editors. 1999, <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/>.
84. Pérez López, B., *Informe de calibración. Determinación in vivo de I-131 en tiroides mediante el sistema LEGE. Det 1*, J.F. Navarro, Editor. 2013.
85. Pérez López, B., *Informe de calibración. Determinación in vivo de I-131 en tiroides mediante los sistemas NaI(Tl) y Fastscan*, J.F. Navarro, Editor. 2013, CIEMAT: Madrid.
86. N44.3, A.N.S.I., *Thyroid radioiodine uptake measurements using a neck phantom*. 1973 (R 1984): New York.
87. White, D.R., et al., *ICRU Report 48: Phantoms and computational models in therapy, diagnosis and protection*. Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements, 2016. **os25**(1): p. NP-NP.
88. WHO, *Patrones de crecimiento infantil*. 2015.
89. American National Standards Institute, I., *ANSI/HPS N13.35. Specifications for the Bottle Manikin Absortion Phantom*. 1999.
90. Etherington, G., et al., *CATHyMARA report: Technical guidelines for radioiodine in thyroid monitoring. OPERRA Deliverable D5.31*. 2017.
91. Pérez López, B., et al., *Calibración de CRC para medida de radioyodo en tiroides del público expuesto* in 5º Congreso Conjunto SEFM y SEPR. 2017, SEPR: Girona.
92. Pérez López, B., J.F. Navarro, and M.A. López. *CIEMAT WBC capabilities for responding in case of nuclear and radiological emergencies* in 3rd International Conference on Dosimetry and its Applications (ICDA3). 2019. Lisbon.
93. M. Isaksson, P.F., J. F. Navarro, J. Oško, B. Perez, *OPERRA Deliverable D5.26: CATHyMARA report: Report of WP4 about intercomparison results for non-trained responders*. 2017.
94. Broggio, D., et al., *Child and adult thyroid monitoring after a reactor accident (CATHyMARA): Technical recommendations and remaining gaps*. Radiation Measurements, 2019.
95. Isaksson, M., et al., *Assessing 131I in thyroid by non-spectroscopic instruments - A European intercomparison exercise*. Radiation Measurements, 2019.
96. Glasstone, S.S., A., *Ingeniería de reactores nucleares*. 1990.
97. ICRP, *Occupational intakes of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134*. 2016.
98. Pérez López, B., et al. *Medida en cuerpo entero de emisores gamma incorporados por población expuesta en emergencia radiológica y nuclear*. in 6º Congreso Conjunto de la SEFM y SEPR. *Aplicaciones de la Radiación más de un siglo de evolución*. 2019. Burgos.
99. LNHB. *Nucléide-Lara. Library for gamma and alpha emissions*. 2019; Available from: <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>.
100. ICRP, *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20 (2)*. 1990.
101. *Real Decreto 783/2001. Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes* 26 de julio de 2001, BOE
102. ICRP, *Report of the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23*. 1975, Pergamon Press, Oxford.
103. López Ponte, M.A., *Tesis: Estimación de la contaminación interna en personas expuestas a la inhalación de actínidos. Medidas in-vivo con detectores de semiconductor LEGE*, in Departamento de Física Atómica, Nuclear y Molecular. 2003, Universidad Complutense de Madrid: Madrid.

104. ATSDR, *TOXICOLOGICAL PROFILE FOR AMERICIUM*, A.f.T.S.a.D. Registry, Editor. 2004, U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES: Atlanta, USA.
105. Pérez López, B., Navarro, J. F., López Ponte, M. A., Nogueira, P., *EFFICIENCY STUDY OF A LEGe DETECTOR SYSTEM FOR THE ASSESSMENT OF 241Am IN SKULL AT CIEMAT WHOLE BODY COUNTER*. Radiation Protection Dosimetry, 2015.
106. Nogueira, P., Rühm, W., Lopez, M. A., Vrba, T., Buchholz, W., Fojtík, P., Etherington, G., Broggio, D., Huikari, J., Marzocchi, O., Lynch, T., Lebacqz, A. L., Li, C., Oško, J., Malátova, I., Franck, D., Breustedt, B., Leone, D., Scott, J., Shutt, A., Hauck, B., Capello, K., Pérez-López, B., Navarro-Amaro, J. F., Pliszczyński, T., Fantínová, K., Tolmachev, S. Y., *EURADOS ²⁴¹Am skull measurement intercomparison*. Radiation Measurements, 2015. **82**: p. 64-73.
107. Vrba, T., Nogueira, P., Broggio, D., Caldeira, M., Capello, K., Fantínová, K., Figueira, C., Hunt, J., Leone, D., Murugan, M., Marzocchi, O., Moraleda, M., Shutt, A., Suh, S., Takahashi, M., Tymieńska, K., Antonia Lopez, M., Tanner, R., *EURADOS intercomparison exercise on MC modeling for the in-vivo monitoring of Am-241 in skull phantoms (Part I)*. Radiation Physics and Chemistry, 2014.
108. Lopez, M.A., et al., *Measurements and Monte Carlo Simulations of 241Am Activities in Three Skull Phantoms: EURADOS-USTUR Collaboration*. Vol. 117. 2019. 1.
109. D. Breitenstein, B., et al., *The U.S. Transuranium Registry Report on the 241Am Content of a Whole Body*. Vol. 49. 1985.
110. Vrba, T., et al., *A simple physical phantom for an intercomparison exercise on 241Am activity determination in the skull*. Vol. 158. 2013.
111. ISO, *ISO/ DIS 20231: Radiological protection- Monitoring and dosimetry for internal exposures due to wound contamination with radionuclides*. 2019.
112. Navarro Amaro, J.F., B. Pérez López, and M.A. López Ponte. *Validación del nuevo procedimiento de calibración y medida de la contaminación en heridas en emergencias. Resultados del laboratorio del CRC (CIEMAT) en campaña internacional de intercomparación*. in *6º Congreso Conjunto de Sociedad Española de Física Médica-Sociedad Española de Protección Radiológica*. 2019. Burgos.

Anexo: Llenado de maniqués de cuerpo entero BOMAB HE2 y HE4

Llenado de maniqués de cuerpo entero BOMAB HE2**CALIBRACIÓN 2009 O.T. - Emisores gamma en organismo total****Maniquí BOMAB HE-2**

Sección	a (cm)	b (cm)	h (cm)	Peso (kg) vacío	Vol. agua mL	(%) Vol	Peso (kg) Lleno
Cabeza (Elip)	14,6	19,05	19,9	0,8	3500	6,06	4,3
Cuello (Circ)	13,3	13,3	10,0	0,4	940	1,63	1,4
Tórax (Elip)	20,5	30	40,0	2,2	17140	29,66	19,1
Abdomen (Elip)	20,8	35,9	20,0	1,8	10100	17,48	11,6
Muslo (Izq) (Circ)	15,1	15,1	40,1	1,0	5915	10,24	6,9
Muslo (Der) (Circ)	15,1	15,1	40,1	1,0	5915	10,24	6,9
Pierna (Der) (Circ)	12	12	40,0	0,8	3560	6,16	4,4
Pierna (Izq) (Circ)	12	12	40,0	1,0	3560	6,16	4,4
Brazo (Izq) (Circ)	10	10	60,1	1,0	3580	6,19	4,6
Brazo (Der) (Circ)	10	10	60,1	1,0	3580	6,19	4,6
TOTAL	-	-	170,0	11	57790	100	68,2

Fuentes de Calibración- Certificado

Radionucleido	Volumen (mL)	Masa (g)	Actividad (Bq)	Bq/ml	Bq/g	T1/2	Fecha Certif.Calib.	t(Llenado) 01-abr-09	Suministador	Referencia
Co-57	5	5,0062	250500	50100,00	50037,95	271,8 d	01-mar-09	31,00	Nucliber	CTZ44
Sn-113	2,205	2,205	56200	25487,53	25487,53	115,09 d	26-mar-09	6,00	Metrología	mrc2009-010
Cs-137(*)	5	5,0181	196700	39340,00	39198,10	30 a	01-ene-03	2282,00	Calib-2003	CDZ44
Co-60	5	5,0073	207100	41420,00	41359,61	5,267 a	01-feb-08	425,00	Nucliber	CKZ44
Y-88	5	5,0174	220700	44140,00	43986,93	106.629 d	01-mar-09	31,00	Nucliber	YEZ44

(*) Los cálculos de la actividad residual de Cs-137 después del llenado 25-09-2003 se detallan en hoja de cálculo específica

ACTIVIDADES QUE SE VAN A INTRODUCIR EN EL BOMAB (2-ABR-2009)

Radionucleido	Actividad (Bq)	T1/2	Fecha Certif.Calib.
Co-57	35000	271,8 d	01-mar-09
Sn-113	40000	115,09 d	26-mar-09
Cs-137	35000	30 a	01-ene-03
Co-60	30000	5,267 a	01-feb-08
Y-88	35000	106.629 d	01-mar-09

CÁLCULO DE GAMMAS /s DE LAS ACTIVIDADES DE LOS ISÓTOPOS DEL BOMAB

Radionucleido	Actividad (Bq)	E (KeV)	le	A (g/s) A(Bq)*le
Co-57	35000	122,06	0,856	29960
Sn-113	40000	391,69	0,649	25960
Cs-137	35000	661,65	0,8512	29792
Co-60	30000	1173,2	0,998	29940
		1332,5	0,999	29970
Y-88	35000	898,042	0,937	32795
		1836,063	0,992	34720

CÁLCULO DE ACTIVIDADES CORREGIDAS A FECHA DE LLENADO (SOLUCIONES ESTÁNDAR)

Radionucleido	Fecha Referencia.	Actividad (Bq)	A (Bq)(*) 02-abr-09	Volumen (mL)	Bq/ml
Co-57	01-mar-09	250500	230852,8	5	46170,6
Sn-113	26-mar-09	56200	53877,7	2,205	24434,3
Cs-137(**)	25-sep-03	161670,5	142301,1	4,1795	34047,4
Co-60	01-feb-08	207100	177612,8	5	35522,6
Y-88	01-mar-09	220700	179221,0	5	35844,2

(*) Decay realizado con programa V.Basic

(**) Los cálculos de la actividad residual de Cs-137 después del llenado 25-09-2003 se detallan en hoja de cálculo específica

Actividades Piezas Maniquí BOMAB

1.- Co-57		Actividad (Bq)	Actividad gammas/s	
		35000	29960	
T1/2 (días)	E (keV)	le		02-abr-09
271,8 d	122,06	0,856		230852,8 en 5 mL

HE-2 Sección	Vol-pieza (%)	Act /Vol-pieza (Bq)	Activ /Vol-pieza (gammas/s)	Vol (mL) Fte Calib
Cabeza	6,06	2119,74	1814,50	0,046
Cuello	1,63	569,30	487,32	0,012
Tórax	29,66	10380,69	8885,87	0,225
Abdomen	17,48	6116,98	5236,13	0,132
Muslo (1)	10,24	3582,37	3066,51	0,078
Muslo (2)	10,24	3582,37	3066,51	0,078
Pierna (1)	6,16	2156,08	1845,61	0,047
Pierna (2)	6,16	2156,08	1845,61	0,047
Brazo (1)	6,19	2168,20	1855,98	0,047
Brazo (2)	6,19	2168,20	1855,98	0,047
Total:	100,00	35000	29960	0,758

2.- Sn-113		Actividad (Bq)	Actividad gammas/s	
		40000	25960	
T1/2 (días)	E (keV)	le		02-abr-09
115,09 d	391,69	0,649		53877,67 en 2.205 mL

HE-2 Sección	Vol-p (%)	Actividad /Vol-p (Bq)	Activ /Vol-p (gammas/s)	Vol (mL) Fte Calib
Cabeza	6,06	2422,56	1572,24	0,099
Cuello	1,63	650,63	422,26	0,027
Tórax	29,66	11863,64	7699,51	0,486
Abdomen	17,48	6990,83	4537,05	0,286
Muslo (1)	10,24	4094,13	2657,09	0,168
Muslo (2)	10,24	4094,13	2657,09	0,168
Pierna (1)	6,16	2464,09	1599,20	0,101
Pierna (2)	6,16	2464,09	1599,20	0,101
Brazo (1)	6,19	2477,94	1608,18	0,101
Brazo (2)	6,19	2477,94	1608,18	0,101
Total:	100,00	40000	25960	1,637

	Actividad (Bq)	Actividad gammas/s		
3.- Cs-137	35000	29792		
T1/2 (años)	E (keV)	le		
30 a	661,65	0,8512		
			02-abr-09	
			142301,11	
			en 4.1795 mL	
HE-2 Sección	Vol-p (%)	Actividad /Vol-p (Bq)	Activ /Vol-p (gammas/s)	Vol (mL) Fte Calib
Cabeza	6,06	2119,74	1804,33	0,062
Cuello	1,63	569,30	484,59	0,017
Tórax	29,66	10380,69	8836,04	0,305
Abdomen	17,48	6116,98	5206,77	0,180
Muslo (1)	10,24	3582,37	3049,31	0,105
Muslo (2)	10,24	3582,37	3049,31	0,105
Pierna (1)	6,16	2156,08	1835,26	0,063
Pierna (2)	6,16	2156,08	1835,26	0,063
Brazo (1)	6,19	2168,20	1845,57	0,064
Brazo (2)	6,19	2168,20	1845,57	0,064
Total:	100,00	35000	29792	1,028

	Actividad (Bq)				
4.- Co-60	30000				
T1/2 (días)	E (keV)	le	A (g/s)		
5,267 a	1173,2	0,998	29940		
	1332,5	0,999	29970		
			E=1173 keV	E=1333 keV	02-abr-09
					177612,8
					en 5 mL
HE-2 Sección	Vol-p (%)	Actividad /Vol-p (Bq)	Activ /Vol-p (gammas/s)	Activ /Vol-p (gammas/s)	Vol (mL) Fte Calib
Cabeza	6,06	1816,92	1813,29	1815,11	0,051
Cuello	1,63	487,97	487,00	487,49	0,014
Tórax	29,66	8897,73	8879,94	8888,84	0,250
Abdomen	17,48	5243,12	5232,64	5237,88	0,148
Muslo (1)	10,24	3070,60	3064,46	3067,53	0,086
Muslo (2)	10,24	3070,60	3064,46	3067,53	0,086
Pierna (1)	6,16	1848,07	1844,37	1846,22	0,052
Pierna (2)	6,16	1848,07	1844,37	1846,22	0,052
Brazo (1)	6,19	1858,45	1854,74	1856,59	0,052
Brazo (2)	6,19	1858,45	1854,74	1856,59	0,052
Total:	100,00	30000	29940	29970	0,845

		(Bq)			
5.- Y-88		35000			
T1/2 (días)	E (keV)	le	A (g/s)		
106.629 d	898,042	0,937	32795		
	1836,063	0,992	34720		
					02-abr-09
					179221,0
					en 5 mL
HE-2	Vol-p	Actividad /Vol-p	Activ /Vol-p	Activ /Vol-p	Vol (mL)
Sección	(%)	(Bq)	(gammas/s)	(gammas/s)	Fte Calib
Cabeza	6,06	2119,74	1986,20	2102,79	0,059
Cuello	1,63	569,30	533,44	564,75	0,016
Tórax	29,66	10380,69	9726,71	10297,64	0,290
Abdomen	17,48	6116,98	5731,61	6068,04	0,171
Muslo (1)	10,24	3582,37	3356,68	3553,71	0,100
Muslo (2)	10,24	3582,37	3356,68	3553,71	0,100
Pierna (1)	6,16	2156,08	2020,25	2138,83	0,060
Pierna (2)	6,16	2156,08	2020,25	2138,83	0,060
Brazo (1)	6,19	2168,20	2031,60	2150,85	0,060
Brazo (2)	6,19	2168,20	2031,60	2150,85	0,060
Total:	100,00	35000	32795	34720	0,976

CÁLCULO DE VOLÚMENES DE LLENADO (ml) EN LAS PIEZAS DEL BOMAB

1.- Cálculo de Volúmenes de las Fuentes de Calibración, por pieza, 30-mar-2009

HE-2	Vol (mL)	Vol (mL)	Vol (mL)	Vol (mL)	Vol (mL)	Vol-Total
Sección	Fte Co-57	Fte Sn-113	Fte Cs-137	Fte Co-60	Fte Y-88	mL-Calib
Cabeza	0,046	0,099	0,062	0,051	0,059	0,318
Cuello	0,012	0,027	0,017	0,014	0,016	0,085
Tórax	0,225	0,486	0,305	0,250	0,290	1,555
Abdomen	0,132	0,286	0,180	0,148	0,171	0,917
Muslo (1)	0,078	0,168	0,105	0,086	0,100	0,537
Muslo (2)	0,078	0,168	0,105	0,086	0,100	0,537
Pierna (1)	0,047	0,101	0,063	0,052	0,060	0,323
Pierna (2)	0,047	0,101	0,063	0,052	0,060	0,323
Brazo (1)	0,047	0,101	0,064	0,052	0,060	0,325
Brazo (2)	0,047	0,101	0,064	0,052	0,060	0,325
Total:	0,758	1,637	1,028	0,845	0,976	5,244

Cálculo de volúmenes de llenado de agua destilada y HCl.02-abr-2009

HE-2 Pieza	Vol. (mL) Total	Vol-Actividad mL-Calib	Vol-HCl mL	Vol-AguaDest mL
Cabeza (Elip)	3500	0,318	29,1	3470,63
Cuello (Circ)	940	0,085	7,8	932,11
Tórax (Elip)	17140	1,555	142,3	16996,18
Abdomen (Elip)	10100	0,917	83,8	10015,25
Muslo (Izq) (Circ)	5915	0,537	49,1	5865,37
Muslo (Der) (Circ)	5915	0,537	49,1	5865,37
Pierna (Der) (Circ)	3560	0,323	29,5	3530,13
Pierna (Izq) (Circ)	3560	0,323	29,5	3530,13
Brazo (Izq) (Circ)	3580	0,325	29,7	3549,96
Brazo (Der) (Circ)	3580	0,325	29,7	3549,96
Total:	57790	5,2441	480	57305,10

Maniqui BOMAB HE-2 CALIBRACIÓN 2014 O.T. - Emisores gamma en organismo total

Sección	a (cm)	b (cm)	h (cm)	Peso (kg) vacio	Vol. agua mL	(%) Vol	Peso (kg) Lleno
Cabeza (Elip)	14,6	19,05	19,9	0,8	3500	6,06	4,3
Cuello (Circ)	13,3	13,3	10,0	0,4	940	1,63	1,4
Tórax (Elip)	20,5	30	40,0	2,2	17140	29,66	19,1
Abdomen (Elip)	20,8	35,9	20,0	1,8	10100	17,48	11,6
Muslo (Izq) (Circ)	15,1	15,1	40,1	1,0	5915	10,24	6,9
Muslo (Der) (Circ)	15,1	15,1	40,1	1,0	5915	10,24	6,9
Pierna (Der) (Circ)	12	12	40,0	0,8	3560	6,16	4,4
Pierna (Izq) (Circ)	12	12	40,0	1,0	3560	6,16	4,4
Brazo (Izq) (Circ)	10	10	60,1	1,0	3580	6,19	4,6
Brazo (Der) (Circ)	10	10	60,1	1,0	3580	6,19	4,6
TOTAL	-	-	170,0	11	57790	100	68,2

Fuentes de Calibración- Certificado

Radionucleido	Volumen (mL)	Masa (g)	Actividad (Bq)	Bq/ml	Bq/g	T1/2	Fecha Certif. Calib.	Suministador	Referencia
Co-57	5	5,0062	250500	50100,00	50037,95	271,8 d	01-mar-09	Nucliber	CTZ44
Sn-113	2,205	2,205	56200	25487,53	25487,53	115,09 d	26-mar-09	Metrologia	mrc2009-010
Cs-137(*)	5	5,0181	196700	39340,00	39198,10	30 a	01-ene-03	Calib-2003	CDZ44
Co-60	5	5,0073	207100	41420,00	41359,61	5,267 a	01-feb-08	Nucliber	CKZ44
Y-88	5	5,0174	220700	44140,00	43986,93	106,629 d	01-mar-09	Nucliber	YEZ44

(*) Los cálculos de la actividad residual de Cs-137 después del llenado 25-09-2003 se detallan en hoja de cálculo específica

ACTIVIDADES INTRODUCIDAS EN EL BOMAB (2-ABR-2009)

Radionucleido	Actividad (Bq)	T1/2	Fecha Certif. Calib.
Co-57	35000	271,8 d	01-mar-09
Sn-113	40000	115,09 d	26-mar-09
Cs-137	35000	30 a	01-ene-03
Co-60	30000	5,267 a	01-feb-08
Y-88	35000	106,629 d	01-mar-09

CÁLCULO DE GAMMAS / s DE LAS ACTIVIDADES DE LOS ISÓTOPOS DEL BOMAB

Radionucleido	Actividad (Bq)	E KeV)	le	A (g/s) A(Bq)*le
Co-57	35000	122,06	0,856	29960
Sn-113	40000	391,69	0,649	25960
Cs-137	35000	661,65	0,8512	29792
Co-60	30000	1173,2	0,998	29940
		1332,5	0,999	29970
Y-88	35000	898,042	0,937	32795
		1836,063	0,992	34720

Radionucleido	Actividad (Bq)		Abacos Med(Bq)		Abacos Bias	
	Med(Bq)	Bias	Med(Bq)	Bias	Med(Bq)	Bias
Co-57	35000	5	36684	5	34605	-1
Sn-113	40000	10	43950	10	42195	5
Cs-137	35000	11	38878	11	36419	4
Co-60	30000	4	31201	4	29433	-2
Y-88	35000	14	39902	14	37629	8

CÁLCULO DE ACTIVIDADES CORREGIDAS A FECHA DE LLENADO (SOLUCIONES ESTÁNDAR)

Radionucleido	Fecha Referencia.	Actividad (Bq)	A (Bq)(*)	Volumen (mL)	Bq/ml
Co-57	01-mar-09	250500	02-abr-09	5	46170,6
Sn-113	26-mar-09	56200	230852,8	2,205	24434,3
Cs-137(**)	25-sep-03	161670,5	53877,7	4,1795	34047,4
Co-60	01-feb-08	207100	142301,1	5	35522,6
Y-88	01-mar-09	220700	177612,8	5	35844,2
			179221,0		

(*) Decay realizado con programa V.Basic

(**) Los cálculos de la actividad residual de Cs-137 después del llenado 25-09-2003 se detallan en hoja de cálculo específica

ACTIVIDADES DE BOMAB HE2 CALCULADAS POR DECAY EN FECHA DE 17 JUL.2014

Radionucleido	A (Bq)	Fecha	A (Bq)(***)
	02-abr-09	Certif.Calib.	17-jul-14
Co-57	35000	T1/2	
		271,8 d	253,64
Sn-113	40000	T1/2	
		115,09 d	0,35
Cs-137	35000	30 a	30982,38
Co-60	30000	5,267 a	14961,52
Y-88	35000	106.629 d	0,12

(***) Decay realizado con el programa Rad Pro Calculator

ACTIVIDADES TOTALES DE BOMAB HE 2 AMPLIADO

Radionucleido	A (Bq)(***) HE2	A (Bq) HE2 AMPLIADO	Actividad (Bq)	A (Bq)
	17-jul-14	17-jul-14	T1/2	17-jul-14
Co-57	253,64	30000	271,8 d	29746,36
Sn-113	0,35	45000	115,09 d	44999,65
Cs-137	30982,38	30982,4	30 a	0,0
Co-60	14961,52	30000	5,267 a	15038,48
Y-88	0,12	50000	106.629 d	49999,88

SOLUCIONES UTILIZADAS PARA LLENAR

Radionucleido	Referencia	Fecha Referencia.	Actividad (Bq)	A (Bq)(***)	Volumen (mL)	Bq/ml
Co-57	FRC-2014-00350	01-may-14	41646	17-jul-14	4,952	6910,5
Sn-113	791731/1	23-jul-14	214398,1	222287,3	5,53	40196,6
Co-60	FRC-2014-00349	24-mar-14	59840	57410,9	3,26933	17560,5
Y-88	794411/2	23-jul-14	190511,88	198087,8	5,036	39334,3

(***) Decay realizado con el programa Rad Pro Calculator

Actividades Piezas Maniqui BOMAB

		Actividad (Bq)	Actividad gammas/s
1.- Co-57		30000	29960
T1/2 (días)	E (keV)		le
271,8 d	122,06		0,856

HE-2 Sección	Vol-pieza (%)	Act /Vol-pieza (Bq)	Activ /Vol-pieza (gammas/s)	02-abr-09		17 jul 2014		17 jul 2014		17 jul 2014	
				Vol (ml)	Fte Calib	A(Bq) HE2	Act /Vol-pieza (Bq)	Vol (ml)	Fte Calib	Act /Vol-pieza (Bq)	Vol (ml)
Cabeza	6,06	2119,74	1814,50	0,046	0,070	15,361	1801,56	0,261			
Cuello	1,63	569,30	487,32	0,012	0,070	4,126	483,85	0,070			
Tórax	29,66	10380,69	8885,87	0,225	1,277	75,227	8822,51	1,277			
Abdomen	17,48	6116,98	5236,13	0,132	0,752	44,329	5198,79	0,752			
Muslo (1)	10,24	3582,37	3066,51	0,078	0,441	25,961	3044,64	0,441			
Muslo (2)	10,24	3582,37	3066,51	0,078	0,441	25,961	3044,64	0,441			
Pierna (1)	6,16	2156,08	1845,61	0,047	0,265	15,625	1832,45	0,265			
Pierna (2)	6,16	2156,08	1845,61	0,047	0,265	15,625	1832,45	0,265			
Brazo (1)	6,19	2168,20	1855,98	0,047	0,267	15,713	1842,74	0,267			
Brazo (2)	6,19	2168,20	1855,98	0,047	0,267	15,713	1842,74	0,267			
Total:	100,00	35000	29960	0,758	4,305	253,640	29746,36	4,305			

HE2 AMPLIADO Vol a introducir

Actividades Piezas Maniquí BOMAB

	Actividad (Bq)	Actividad gammas/s
	40000	25960
T1/2 (días)	E (keV)	le
115,09 d	391,69	0,649

2.- Sn-113	02-abr-09		17 jul 2014		17 jul 2014		17 jul 2014	
	53877,67 en 2.205 mL							
HE-2 Sección	Vol-p (%)	Actividad /Vol-p (Bq)	Activ /Vol-p (gammas/s)	Vol (mL) Fte Calib	A(Bq) HE2	Act /Vol-pieza (Bq)	Vol (ml) Fte Calib	
Cabeza	6,06	2422,56	1572,24	0,099	0,021	2725,36	0,068	
Cuello	1,63	650,63	422,26	0,027	0,006	731,95	0,018	
Tórax	29,66	11863,64	7699,51	0,486	0,104	13346,50	0,332	
Abdomen	17,48	6990,83	4537,05	0,286	0,061	7864,62	0,196	
Muslo (1)	10,24	4094,13	2657,09	0,168	0,036	4605,86	0,115	
Muslo (2)	10,24	4094,13	2657,09	0,168	0,036	4605,86	0,115	
Pierna (1)	6,16	2464,09	1599,20	0,101	0,022	2772,08	0,069	
Pierna (2)	6,16	2464,09	1599,20	0,101	0,022	2772,08	0,069	
Brazo (1)	6,19	2477,94	1608,18	0,101	0,022	2787,66	0,069	
Brazo (2)	6,19	2477,94	1608,18	0,101	0,022	2787,66	0,069	
Total:	100,00	40000	25960	1,637	0,350	44999,65	1,119	

HE2 AMPLIADO Vol a introducir

Actividades Piezas Maniquí BOMAB

		Actividad (Bq)	Actividad gammas/s		
3.- Cs-137		35000	29792		
T1/2 (años)	E (keV)	le		02-abr-09	
30 a	661,65	0,8512		142301,11 en 4.1795 mL	
HE-2 Sección	Vol-p (%)	Actividad (Bq)	Activ /Vol-p (gammas/s)	Vol (mL)	Fte Calib
Cabeza	6,06	2119,74	1804,33	0,062	
Cuello	1,63	569,30	484,59	0,017	
Tórax	29,66	10380,69	8836,04	0,305	
Abdomen	17,48	6116,98	5206,77	0,180	
Muslo (1)	10,24	3582,37	3049,31	0,105	
Muslo (2)	10,24	3582,37	3049,31	0,105	
Pierna (1)	6,16	2156,08	1835,26	0,063	
Pierna (2)	6,16	2156,08	1835,26	0,063	
Brazo (1)	6,19	2168,20	1845,57	0,064	
Brazo (2)	6,19	2168,20	1845,57	0,064	
Total:	100,00	35000	29792	1,028	

Actividades Piezas Maniquí BOMAB

Actividad (Bq)		30000	
T1/2 (días)	E (keV)	le	A (g/s)
5,267 a	1173,2	0,998	29940
	1332,5	0,999	29970

HE-2 Sección	Vol-p (%)	Actividad /Vol-p (Bq)	E=1173 keV		E=1333 keV		HE2 AMPLIADO		Vol (ml) Fte Calib
			Activ /Vol-p (gamas/s)	Activ /Vol-p (gamas/s)	Activ /Vol-p (gamas/s)	Act /Vol-pieza (Bq)	Vol (ml) Fte Calib		
Cabeza	6,06	1816,92	1813,29	1815,11	906,13	910,79	0,051	0,052	
Cuello	1,63	487,97	487,00	487,49	243,36	244,61	0,014	0,014	
Tórax	29,66	8897,73	8879,94	8888,84	4437,45	4460,28	0,250	0,254	
Abdomen	17,48	5243,12	5232,64	5237,88	2614,84	2628,29	0,148	0,150	
Muslo (1)	10,24	3070,60	3064,46	3067,53	1531,36	1539,24	0,086	0,088	
Muslo (2)	10,24	3070,60	3064,46	3067,53	1531,36	1539,24	0,086	0,088	
Pierna (1)	6,16	1848,07	1844,37	1846,22	921,66	926,41	0,052	0,053	
Pierna (2)	6,16	1848,07	1844,37	1846,22	921,66	926,41	0,052	0,053	
Brazo (1)	6,19	1858,45	1854,74	1856,59	926,84	931,61	0,052	0,053	
Brazo (2)	6,19	1858,45	1854,74	1856,59	926,84	931,61	0,052	0,053	
Total:	100,00	30000	29940	29970	14961,52	15038,480	0,845	0,856	

02-abr-09
177612,8
en 5 mL
Vol a introducir

Actividades Piezas Maniqui BOMAB

	(Bq)
5.- Y-88	35000
T1/2 (días)	le
106.629 d	0,937
	0,992
	32795
	34720

HE-2 Sección	Vol-p (%)	Actividad /Vol-p (Bq)	E=898 keV		E=1836 keV		Vol (ml) Fte Calib	Vol (ml) Fte Calib
			Activ /Vol-p (gamas/s)	Activ /Vol-p (gamas/s)	Activ /Vol-p (gamas/s)	Activ /Vol-p (gamas/s)		
Cabeza	6,06	2119,74	1986,20	2102,79	0,059	3028,20	0,077	
Cuello	1,63	569,30	533,44	564,75	0,016	813,29	0,021	
Tórax	29,66	10380,69	9726,71	10297,64	0,290	14829,52	0,377	
Abdomen	17,48	6116,98	5731,61	6068,04	0,171	8738,52	0,222	
Muslo (1)	10,24	3582,37	3356,68	3553,71	0,100	5117,66	0,130	
Muslo (2)	10,24	3582,37	3356,68	3553,71	0,100	5117,66	0,130	
Pierna (1)	6,16	2156,08	2020,25	2138,83	0,060	3080,11	0,078	
Pierna (2)	6,16	2156,08	2020,25	2138,83	0,060	3080,11	0,078	
Brazo (1)	6,19	2168,20	2031,60	2150,85	0,060	3097,41	0,079	
Brazo (2)	6,19	2168,20	2031,60	2150,85	0,060	3097,41	0,079	
Total:	100,00	35000	32795	34720	0,976	42,000	1,271	

02-abr-09 17 jul 2014 17 jul 2014 17 jul 2014

179221,0 en 5 mL

HE2 AMPLIADO Vol a introducir

A(Bq) HE2	Act /Vol-pieza (Bq)	Vol (ml) Fte Calib	Vol (ml) Fte Calib
2,544	3028,20	0,059	0,077
0,683	813,29	0,016	0,021
12,457	14829,52	0,290	0,377
7,340	8738,52	0,171	0,222
4,299	5117,66	0,100	0,130
4,299	5117,66	0,100	0,130
2,587	3080,11	0,060	0,078
2,587	3080,11	0,060	0,078
2,602	3097,41	0,060	0,079
2,602	3097,41	0,060	0,079
42,000	49999,88	0,976	1,271

Tabla resumen de volúmenes de relleno de fuente y pieza e incertidumbre en fecha 17/07/2014

HE-2 Ampliado	Vol (mL)		Incertidumbre (ml)		Vol (mL)		Incertidumbre (m)		Vol (mL)		certidumbre (m)		Vol (mL)		Incertidumbre		Vol-Total	
	Fte Co-57	Fte Sn-113	Fte Co-57	Fte Sn-113	Fte Co-60	Fte Sn-113	Fte Co-60	Fte Sn-113	Fte Co-60	Fte Sn-113	Fte Co-60	Fte Sn-113	Fte Co-60	Fte Sn-113	Fte Y-88	Fte Y-88	Fte Y-88	Fte Y-88
Cabeza	0,261	0,068	0,002	0,001	0,052	0,001	0,000	0,000	0,077	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,460
Cuello	0,070	0,018	0,001	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,124
Tórax	1,277	0,332	0,020	0,002	0,254	0,002	0,002	0,002	0,377	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	2,252
Abdomen	0,752	0,196	0,005	0,002	0,150	0,002	0,001	0,001	0,222	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	1,327
Muslo (1)	0,441	0,115	0,003	0,001	0,088	0,001	0,001	0,001	0,130	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,777
Muslo (2)	0,441	0,115	0,003	0,001	0,088	0,001	0,001	0,001	0,130	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,777
Pierna (1)	0,265	0,069	0,002	0,001	0,053	0,001	0,001	0,001	0,078	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,468
Pierna (2)	0,265	0,069	0,002	0,001	0,053	0,001	0,001	0,001	0,078	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,468
Brazo (1)	0,267	0,069	0,002	0,001	0,053	0,001	0,001	0,001	0,079	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,470
Brazo (2)	0,267	0,069	0,002	0,001	0,053	0,001	0,001	0,001	0,079	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,470

Técnicos de laboratorio

Cabrera Hernández
Carolina Hernández González




Responsable laboratorio de CRC


[Signature]

J. Fo. Navarro Aguero

Responsable laboratorio de BIO

[Signature]
Inventado Senz

	<p align="center">Dosimetría Personal Interna Laboratorio CRC</p>	
<p align="center">Documento interno</p>	<p align="center">CIEMAT/DR/DPI/36/2016</p>	
<p align="center">Llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides</p>		
<p>Nº de revisión</p>	<p>Fecha</p>	<p>Paginas</p>
<p align="center">0</p>	<p align="center">30/11/2016</p>	
<p>Elaborado por</p>		<p>Revisado por</p>
<p>Begoña Pérez</p>		<p>J. Francisco Navarro</p>
		

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	2 de 13

1. Introducción

La calibración de organismo total es necesaria para poder medir "in vivo" contaminantes radiactivos emisores gamma en trabajadores expuestos. Es necesario disponer de maniqués que simulen todo el organismo. Hay diferentes tipos de maniqués, tipo ladrillo de polietileno, en el que las fuentes radiactivas son en forma de varilla y se van introduciendo en cada ladrillo. Hay otro maniquí, el BOMAB que consiste en varios recipientes de polietileno, que simulan las diferentes partes del cuerpo. En su interior hay agua destilada en medio ácido y las fuentes radiactivas emisores gamma. El maniquí utilizado en el CRC-CIEMAT es tipo BOMAB.

La calibración de yodo en tiroides también necesita un patrón. Consiste en un maniquí simulador de cuello en el que se introduce un recipiente simulador de tiroides. El CRC -CIEMAT dispone de un maniquí de cuello de metacrilato con un hueco, en el que se introduce un vial simulador del tiroides.

2. Objeto

Llenar un maniquí tipo BOMAB simulador de un hombre adulto para que simule una persona contaminada con emisores gamma.

Llenar un vial de 20 ml simulador de tiroides de hombre adulto.

3. Materiales


Los maniqués utilizados son de dos tipos, un maniquí BOMAB en el que se introduce en su interior las fuentes radiactivas no encapsuladas, simula el cuerpo entero. Y el segundo es un maniquí de cuello formado por un cilindro, con un hueco en el que se introduce la fuente encapsulada en forma de vial.

3.1. Maniquí de cuerpo entero

Un maniquí simulador del cuerpo entero es Bottle Mannequin Absorber (BOMAB). Consiste en 11 piezas de polietileno con el interior hueco y tiene un agujero en forma de rosca y un tornillo para cerrarlo de forma hermética. Cada pieza tiene una forma y dimensiones cumple los criterios de aceptación de la ANSI 13.35. El BOMAB que se va a llenar tiene la referencia de HE4. Cada pieza está señalada con la parte del cuerpo que corresponde.

Tabla 1: Dimensiones de BOMAB HE4

Pieza	Sección	a (cm)	b (cm)	h (cm)	V agua (ml)
Cabeza	Elipse	14,2	19,2	20,0	3500
Cuello	Circular	12,9	12,9	10,0	900
Tórax	Elipse	20,1	29,8	40,1	17000
Abdomen	Elipse	20	36,2	20,1	9900
Muslo (Izq)	Circular	15	15	40,0	5800
Muslo (Der)	Circular	15	15	40,0	5800
Pierna (Der)	Circular	11,9	11,9	39,8	3500
Pierna (Izq)	Circular	11,9	11,9	39,8	3500
Brazo (Izq)	Circular	10	10	59,7	3450
Brazo (Der)	Circular	10	10	59,7	3450

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	3 de 13

3.2. Maniquí de cuello

El cuello simulador es un cilindro de metacrilato con dimensiones similares al cuello de hombre adulto, es de la marca BIODEx. Tiene un hueco en el que se introduce un vial simulador de tiroides. El vial es de polietileno con una rosca que permite cerrarlo herméticamente con un tapón. Su capacidad es de 20 ml.

3.3. Fuentes radiactivas disponibles

Las fuentes radiactivas han sido compradas a Areva. La referencia, actividades y volúmenes se muestran en la Tabla 2. El Co57, Sn113, Cs137, Co60 y Cs134 son las utilizadas en el llenado del maniquí BOMAB y Cs137 y Ba133 para el llenado del vial simulador de tiroides.


Tabla 2: Fuentes radiactivas utilizadas en el BOMAB HE4

Radionucleido	Codigo Referencia	Fecha Referencia	Actividad (Bq)	Δ (%)	A (Bq) 17-nov-16	V (ml)	Bq/ml 17-nov-16
Co-57	CO57ELSB30 8066211/1	22-sep-16	219553,4	1,5	190333,6	5,0398	37765,8
Sn-113	SN113ELSB30 8058112/2	01-oct-16	255298,2	2,5	188087,9	5,0127	37522,1
Cs-137	CS137ELSB30 79301132/3	02-sep-16	199694,56	2,5	198738,4	5,0329	39488,1
Co-60	CO60ELSB30 7933511/2	02-sep-16	205639,2	1,5	200085,3	5,0498	39622,4
Cs134	CS134ELSB30 809211/1	21-sep-16	204866,24	1,5	194403,0	5,0209	38718,6
Ba-133	Ba133ELSB30 802642/1	12-sep-16	209005,14	1,8	206527,5	5,1340	40227,4

Las emisiones características y las intensidades de emisión de las fuentes utilizadas están descritas en la Tabla 3.

Tabla 3: Características de las fuentes del BOMAB

Radionucleido	Actividad (Bq)	E (keV)	le (%)
Co-57	190333,6	122,06	0,856
Sn-113	188087,9	391,69	0,649
Cs-137	198738,4	661,65	0,85
Co-60	200085,3	1173,2	0,998
		1332,5	0,999
Cs134	194403,0	563,2	0,084
		569,3	0,154
		604,7	0,976
		795,8	0,854
Ba-133	206527,5	81	0,36
		276	0,07
		303	0,18
		356	0,62
		384	0,09

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	4 de 13

4. Desarrollo

4.1. Prueba de hermeticidad

Previo al llenado de los maniqués se necesita realizar una prueba de hermeticidad. Esta consiste en rellenar los diferentes recipientes de agua, y dejarlos llenos durante varios días para comprobar si hay pérdidas.

4.2. Medida de volúmenes

Se rellenan las piezas para medir los volúmenes que se pueden introducir en cada una de ellas. Las medidas se realizan con probetas de diferentes volúmenes y agua, en el laboratorio de CRC. Las medidas de los volúmenes a introducir en el maniquí BOMAB, se exponen en la Tabla 1. El volumen del vial es de 20 ml.

4.3. Calculo de volúmenes


Una vez que se sabe los volúmenes que se pueden introducir en cada pieza hay que calcular el volumen de las fuentes radiactivas a introducir en cada una de ellas para que sea una contaminación homogénea en todas ellas en conjunto. Para ello es necesario saber la actividad de la fuente disponible para llenar, y el volumen que ocupa, así como la actividad que se quiere introducir en todo el maniquí. Cada una de las piezas tiene un porcentaje de volumen total, que va a servir para saber qué cantidad va en cada pieza.

Se calcula la actividad de cada radionucleido en cada pieza.

Tabla 4: Volumen y actividad de las fuentes en cada pieza

Co-57	Act.Final (Bq)		17-nov-16	
	25000			
T1/2 (días)	E (keV)	Ie	190333,6	A(Bq)
271,4	122,06	0,856	5,0398	V(ml)

Referencia Bomab	Vol-pieza	Act /Vol-pieza	V (ml)
Sección	(%)	(Bq)	Fte Calib
Cabeza	6,16	1540,5	0,041
Cuello	1,58	396,1	0,010
Tórax	29,93	7482,4	0,198
Abdomen	17,43	4357,4	0,115
Muslo (1)	10,21	2552,8	0,068
Muslo (2)	10,21	2552,8	0,068
Pierna (1)	6,16	1540,5	0,041
Pierna (2)	6,16	1540,5	0,041
Brazo (1)	6,07	1518,5	0,040
Brazo (2)	6,07	1518,5	0,040
Total:	100,00	25000,0	0,662


 Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas SDR Servicio Dosimetría de Radiaciones	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código: CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha: 30/11/2016
		Página: 5 de 13

Sn-113	Act.Final (Bq)			
	42200		17-nov-16	
T1/2 (días)	E (keV)	le	188087,9	A(Bq)
106,63	391,69	0,649	5,0127	V(ml)

Referencia Bomab	Vol-pieza	Act /Vol-pieza	V (ml)
Sección	(%)	(Bq)	Fte Calib
Cabeza	6,16	2600,4	0,069
Cuello	1,58	668,7	0,018
Tórax	29,93	12630,3	0,337
Abdomen	17,43	7355,3	0,196
Muslo (1)	10,21	4309,2	0,115
Muslo (2)	10,21	4309,2	0,115
Pierna (1)	6,16	2600,4	0,069
Pierna (2)	6,16	2600,4	0,069
Brazo (1)	6,07	2563,2	0,068
Brazo (2)	6,07	2563,2	0,068
Total:	100,00	42200,0	1,125

Cs-137	Act.Final (Bq)			
	20000		17-nov-16	
T1/2 (años)	E (keV)	le	198738,4	A(Bq)
30,13	661,65	0,85	5,0329	V(ml)

Referencia Bomab	Vol-pieza	Act /Vol-pieza	V (ml)
Sección	(%)	(Bq)	Fte Calib
Cabeza	6,16	1232,39	0,031
Cuello	1,58	316,90	0,008
Tórax	29,93	5985,92	0,152
Abdomen	17,43	3485,92	0,088
Muslo (1)	10,21	2042,25	0,052
Muslo (2)	10,21	2042,25	0,052
Pierna (1)	6,16	1232,39	0,031
Pierna (2)	6,16	1232,39	0,031
Brazo (1)	6,07	1214,79	0,031
Brazo (2)	6,07	1214,79	0,031
Total:	100,00	20000,00	0,506

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	6 de 13

Co-60	Act.Final (Bq)		
	10000		
T1/2 (años)	E (keV)	le	17-nov-16
5,27	1173,2	0,998	200085,3
	1332,5	0,999	5,0498

A(Bq)
V(ml)

Referencia Bomab	Vol-pieza	Act /Vol-pieza	V (ml)
	(%)	(Bq)	Fte Calib
Cabeza	6,16	616,20	0,016
Cuello	1,58	158,45	0,004
Tórax	29,93	2992,96	0,076
Abdomen	17,43	1742,96	0,044
Muslo (1)	10,21	1021,13	0,026
Muslo (2)	10,21	1021,13	0,026
Pierna (1)	6,16	616,20	0,016
Pierna (2)	6,16	616,20	0,016
Brazo (1)	6,07	607,39	0,015
Brazo (2)	6,07	607,39	0,015
Total:	100,00	10000,00	0,252

Cs-134	Act.Final (Bq)		
	20000		
T1/2 (años)	E (keV)	le	17-nov-16
2,0648	563,2	0,084	194403,0
	569,3	0,154	5,0209
	604,7	0,976	
	795,8	0,854	

A(Bq)
V(ml)

Referencia Bomab	Vol-pieza	Act /Vol-pieza	V (ml)
	(%)	(Bq)	Fte Calib
Cabeza	6,16	1232,39	0,032
Cuello	1,58	316,90	0,008
Tórax	29,93	5985,92	0,155
Abdomen	17,43	3485,92	0,090
Muslo (1)	10,21	2042,25	0,053
Muslo (2)	10,21	2042,25	0,053
Pierna (1)	6,16	1232,39	0,032
Pierna (2)	6,16	1232,39	0,032
Brazo (1)	6,07	1214,79	0,031
Brazo (2)	6,07	1214,79	0,031
Total:	100,00	20000,00	0,517


	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	7 de 13

Tabla 5: Volumen y actividad de las fuentes en el vial

	A (17/11/2016)	Volumen vial	V fuente
Radionucleido	(Bq)	(ml)	(ml)
Ba-133	8000	20	0,1989
Ca-137	889	20	0,0225

Una vez que se sabe el volumen que cabe en cada una de las piezas y el volumen total de las fuentes que hay que rellenar en cada pieza, se calcula el volumen de ácido nítrico (HNO₃) necesario y de agua destilada que hay que introducir. El HNO₃ es concentrado, y se introduce un 0,83 % del volumen total. Por tanto, de agua destilada será la resta del volumen total menos el volumen de las fuentes y del HNO₃, (ver Tabla 6).

Tabla 6: Volúmenes de agua destilada, ácido nítrico y fuente a introducir en las piezas del maniquí BOMAB HE4

Maniquí	V (mL)	V fuente	V HNO₃	V H₂O Destilada
Pieza	Total	ml	ml	ml
Cabeza	3500	0,189	29,05	3470,76
Cuello	900	0,049	7,47	892,48
Tórax	17000	0,916	141,10	16857,98
Abdomen	9900	0,534	82,17	9817,30
Muslo (Izq)	5800	0,313	48,14	5751,55
Muslo (Der)	5800	0,313	48,14	5751,55
Pierna (Der)	3500	0,189	29,05	3470,76
Pierna (Izq)	3500	0,189	29,05	3470,76
Brazo (Izq)	3450	0,186	28,64	3421,18
Brazo (Der)	3450	0,186	28,64	3421,18
Total:	56800	3,062	471,44	56325,50

4.4. Llenado de maniqués


El llenado de los maniqués se lleva a cabo en el laboratorio de Bioeliminación del Ciemat. Dispone de las instalaciones adecuadas para introducir las fuentes radiactivas en los maniqués. Las diferentes actuaciones sobre del llenado de los maniqués están documentados en el anexo 1.

Llenado de agua destilada

El llenado de agua destilada se hace con probetas de 2 l, 1l, 50 ml. En cada pieza se introducen los valores calculados de la tabla última columna.

Llenado de HNO₃

El ácido nítrico utilizado es concentrado. Se manipula con las pipetas apropiadas para cada caso, dependiendo del volumen a introducir. Los valores que se introducen son los dados por la columna 4 de la Tabla 6.

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	8 de 13

Llenado de fuentes radiactivas

Se realiza en el interior de una campana extractora. Utilizando las pipetas con referencia EQ BIO 57, EQ BIO 61, EQ BIO 62, EQ BIO 75, dependiendo del volumen de fuente radiactiva a introducir en cada pieza (ver tabla).

Tabla 7: Resumen de los volúmenes de las fuentes introducidas en cada pieza del BOMAB HE4.

Maniquí	V (ml)	V (ml)	V (ml)	V (ml)	V (ml)	V total
Sección	Co57	Sn113	Cs137	Co60	Cs134	ml
Cabeza	0,041	0,069	0,031	0,016	0,032	0,189
Cuello	0,010	0,018	0,008	0,004	0,008	0,049
Tórax	0,198	0,337	0,152	0,076	0,155	0,916
Abdomen	0,115	0,196	0,088	0,044	0,090	0,534
Muslo	0,068	0,115	0,052	0,026	0,053	0,313
Muslo	0,068	0,115	0,052	0,026	0,053	0,313
Pierna	0,041	0,069	0,031	0,016	0,032	0,189
Pierna	0,041	0,069	0,031	0,016	0,032	0,189
Brazo	0,040	0,068	0,031	0,015	0,031	0,186
Brazo	0,040	0,068	0,031	0,015	0,031	0,186
Total:	0,662	1,125	0,506	0,252	0,517	3,062

4.5. Cálculo de incertidumbres

Las incertidumbres de la actividad de la fuente se deben a la incertidumbre de la actividad total de la fuente, del volumen total de la fuente y del propio llenado. Dependiendo de la pipeta y del volumen introducido hay diferentes incertidumbres. Las incertidumbres proporcionadas para las pipetas utilizadas están descritas en el anexo 2.

El cálculo de las incertidumbres de la actividad se realiza a través de la fórmula:

$$\Delta A = \frac{\Delta V}{V_T} \cdot A_T + \frac{V}{V_T} \cdot \Delta A_T + \frac{V}{V_T^2} \cdot A_T \cdot \Delta V_T$$

4.6. Incertidumbres en el maniquí BOMAB HE4

En el maniquí BOMAB se calcula la incertidumbre de la actividad en cada pieza y por cada radionucleido introducido. Posteriormente, se calcula la incertidumbre por cada radionucleido en todo el conjunto del maniquí por la fórmula de propagación de errores.

$$\Delta A_{Fuente} = \sqrt{\sum_i (\Delta A_i)^2}$$



	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	9 de 13

Tabla 8: Volúmenes y actividades e incertidumbres de las fuentes. Referencia de las pipetas utilizadas en el llenado para cada pieza

Co57	V (ml)	ΔV (ml)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Código de pipeta
Cabeza	0,041	0,000449	1540,5	63,2	EQ BIO 61
Cuello	0,010	0,000147	396,1	17,4	EQ BIO 62
Tórax	0,198	0,000614	7482,4	247,7	EQ BIO 75
Abdomen	0,115	0,000877	4357,4	163,8	EQ BIO 61
Muslo (Izq)	0,068	0,000744	2552,8	104,7	EQ BIO 61
Muslo (Der)	0,068	0,000744	2552,8	104,7	EQ BIO 61
Pierna (Der)	0,041	0,000449	1540,5	63,2	EQ BIO 61
Pierna (Izq)	0,041	0,000449	1540,5	63,2	EQ BIO 61
Brazo (Izq)	0,040	0,000442	1518,5	62,3	EQ BIO 61
Brazo (Der)	0,040	0,000442	1518,5	62,3	EQ BIO 61
Total:	0,662	0,002	25000,0	360,7	

Sn113	V (ml)	ΔV (ml)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Código de pipeta
Cabeza	0,069	0,000763	2600,4	158,9	EQ BIO 61
Cuello	0,018	0,000250	668,7	42,9	EQ BIO 62
Tórax	0,337	0,002427	12630,3	723,5	EQ BIO 57
Abdomen	0,196	0,000609	7355,3	391,1	EQ BIO 75
Muslo (Izq)	0,115	0,000357	4309,2	229,1	EQ BIO 75
Muslo (Der)	0,115	0,000357	4309,2	229,1	EQ BIO 75
Pierna (Der)	0,069	0,000763	2600,4	158,9	EQ BIO 61
Pierna (Izq)	0,069	0,000763	2600,4	158,9	EQ BIO 61
Brazo (Izq)	0,068	0,000753	2563,2	156,6	EQ BIO 61
Brazo (Der)	0,068	0,000753	2563,2	156,6	EQ BIO 61
Total:	1,126	0,003	42200,0	952,9	

Cs137	V (ml)	ΔV (ml)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Código de pipeta
Cabeza	0,031	0,000343	1232,4	75,2	EQ BIO 61
Cuello	0,008	0,000112	316,9	20,3	EQ BIO 62
Tórax	0,152	0,000470	5985,9	317,9	EQ BIO 75
Abdomen	0,088	0,000971	3485,9	212,6	EQ BIO 61
Muslo (Izq)	0,052	0,000569	2042,3	124,6	EQ BIO 61
Muslo (Der)	0,052	0,000569	2042,3	124,6	EQ BIO 61
Pierna (Der)	0,031	0,000343	1232,4	75,2	EQ BIO 61
Pierna (Izq)	0,031	0,000343	1232,4	75,2	EQ BIO 61
Brazo (Izq)	0,031	0,000338	1214,8	74,1	EQ BIO 61
Brazo (Der)	0,031	0,000338	1214,8	74,1	EQ BIO 61
Total:	0,506	0,002	20000,0	453,5	

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	10 de 13

Co60	V (ml)	ΔV (ml)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Código de pipeta
Cabeza	0,016	0,000171	616,2	25,3	EQ BIO 61
Cuello	0,004	0,000052	158,5	6,8	EQ BIO 62
Tórax	0,076	0,000831	2993,0	122,7	EQ BIO 61
Abdomen	0,044	0,000484	1743,0	71,5	EQ BIO 61
Muslo (Izq)	0,026	0,000283	1021,1	41,9	EQ BIO 61
Muslo (Der)	0,026	0,000283	1021,1	41,9	EQ BIO 61
Pierna (Der)	0,016	0,000467	616,2	37,0	EQ BIO 61
Pierna (Izq)	0,016	0,000467	616,2	37,0	EQ BIO 61
Brazo (Izq)	0,015	0,000460	607,4	36,4	EQ BIO 61
Brazo (Der)	0,015	0,000460	607,4	36,4	EQ BIO 61
Total:	0,252	0,001	10000,0	172,5	

Cs-134	V (ml)	ΔV (ml)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Código de pipeta
Cabeza	0,032	0,000350	1232,4	50,5	EQ BIO 61
Cuello	0,008	0,000106	316,9	13,6	EQ BIO 62
Tórax	0,155	0,000479	5985,9	198,1	EQ BIO 75
Abdomen	0,090	0,000990	3485,9	142,9	EQ BIO 61
Muslo (Izq)	0,053	0,000580	2042,3	83,7	EQ BIO 61
Muslo (Der)	0,053	0,000580	2042,3	83,7	EQ BIO 61
Pierna (Der)	0,032	0,000350	1232,4	50,5	EQ BIO 61
Pierna (Izq)	0,032	0,000350	1232,4	50,5	EQ BIO 61
Brazo (Izq)	0,031	0,000345	1214,8	49,8	EQ BIO 61
Brazo (Der)	0,031	0,000345	1214,8	49,8	EQ BIO 61
Total:	0,517	0,002	20000,0	294,1	

Los volúmenes y actividades introducidas en el conjunto del maniquí BOMAB HE4 están expuestos en la Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 9: Volúmenes y actividades totales e incertidumbres de las fuentes, en maniquí BOMAB HE4

HE4	V (ml)	ΔV (ml)	A (Bq)	ΔA (Bq)
Co-57	0,662	0,002	25000	361
Sn-113	1,126	0,003	42200	953
Cs-137	0,506	0,002	20000	453
Co-60	0,252	0,001	10000	172
Cs134	0,517	0,002	20000	294

4.7. Incertidumbres en el vial

Las incertidumbres de las fuentes introducidas en el vial están en la Tabla 10.



	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	11 de 13

Tabla 10: Volúmenes, actividades e incertidumbres del vial.

	V (ml)	ΔV (ml)	A (Bq)	ΔA (Bq)	Código de pipeta
Ba-133	0,199	0,00062	8000	242	EQ BIO 75
Cs137	0,023	0,00068	889	71	EQ BIO 61

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	12 de 13

Anexo 1: Llenado de los maniqués.

PT CRC 300 R7

Volúmenes de llenado de agua destilada y HNO3 BOMAB HE4

Maniquí Pieza	V (mL) Total	V Actividad ml	V HNO3 ml	V H2O Dest ml
Cabeza (Elip)	3500	0,19	29,05	3470,76
Cuello (Circ)	900	0,05	7,47	892,48
Tórax (Elip)	17000	0,92	141,10	16857,98
Abdomen (Elip)	9900	0,53	82,17	9817,30
Muslo (Izq) (Circ)	5800	0,31	48,14	5751,55
Muslo (Der) (Circ)	5800	0,31	48,14	5751,55
Pierna (Der) (Circ)	3500	0,19	29,05	3470,76
Pierna (Izq) (Circ)	3500	0,19	29,05	3470,76
Brazo (Izq) (Circ)	3450	0,19	28,64	3421,18
Brazo (Der) (Circ)	3450	0,19	28,64	3421,18
Total:	56800	3,06	471,44	56325,50

14-16/11/2016 Relleno agua destilada

Fdo.: Begoña Pérez
Laboratorio CRC-CIEMAT

Fdo.: J.F. Navarro
LaboratorioCRC-CIEMAT



16/11/2016 Relleno NHO3

Fdo.: Begoña Pérez
Laboratorio CRC-CIEMAT

Fdo.: J.F. Navarro
LaboratorioCRC-CIEMAT



PT CRC 300 R7

Volúmenes de llenado de agua destilada y HNO3 Vial

V total	V nucleidos	V HNO3	V H2O destilada
ml	ml	ml	ml
20	0,00	0,17	19,83

17-nov Relleno agua destilada

Fdo.: Begoña Pérez
Laboratorio CRC-CIEMAT

Fdo.: J.F. Navarro
LaboratorioCRC-CIEMAT



17/11/2016 Relleno NHO3

Fdo.: Begoña Pérez
Laboratorio CRC-CIEMAT

Fdo.: J.F. Navarro
LaboratorioCRC-CIEMAT



Volumenes, actividades e incertidumbres del vial

	V (ml)	A (Bq)	Codigo de pipeta
Ba-133	0,199	8000	EQ-BIO-75
Cs137	0,023	889	EQ-BIO-61

Fdo.: Carolina Hernandez
Laboratorio BIO-CIEMAT

Fdo.: Inmaculada Sierra
Laboratorio BIO-CIEMAT



PT CRC 300 R7

Volumenes de relleno de radionucleidos BOMAB HE4

Co57	V (ml)	A (Bq)	Codigo de pipeta
Cabeza	0,041	1540,5	EQ-BIO-61
Cuello	0,010	396,1	EQ-BIO-62
Tórax	0,198	7482,4	EQ-BIO-75
Abdomen	0,115	4357,4	EQ-BIO-61
Muslo (1)	0,068	2552,8	EQ-BIO-61
Muslo (2)	0,068	2552,8	EQ-BIO-61
Pierna (1)	0,041	1540,5	EQ-BIO-61
Pierna (2)	0,041	1540,5	EQ-BIO-61
Brazo (1)	0,040	1518,5	EQ-BIO-61
Brazo (2)	0,040	1518,5	EQ-BIO-61
Total:	0,662	25000,0	

Sn113	V (ml)	A (Bq)	Codigo de pipeta
Cabeza	0,069	2156,7	EQ-BIO-61
Cuello	0,018	554,6	EQ-BIO-62
Tórax	0,337	10475,4	EQ-BIO-57
Abdomen	0,196	6100,4	EQ-BIO-75
Muslo (1)	0,115	3573,9	EQ-BIO-75
Muslo (2)	0,115	3573,9	EQ-BIO-75
Pierna (1)	0,069	2156,7	EQ-BIO-61
Pierna (2)	0,069	2156,7	EQ-BIO-61
Brazo (1)	0,068	2125,9	EQ-BIO-61
Brazo (2)	0,068	2125,9	EQ-BIO-61
Total:	1,126	35000,0	

Cs137	V (ml)	A (Bq)	Codigo de pipeta
Cabeza	0,031	1232,4	EQ-BIO-61
Cuello	0,008	316,9	EQ-BIO-62
Tórax	0,152	5985,9	EQ-BIO-75
Abdomen	0,088	3485,9	EQ-BIO-61
Muslo (1)	0,052	2042,3	EQ-BIO-61
Muslo (2)	0,052	2042,3	EQ-BIO-61
Pierna (1)	0,031	1232,4	EQ-BIO-61
Pierna (2)	0,031	1232,4	EQ-BIO-61
Brazo (1)	0,031	1214,8	EQ-BIO-61
Brazo (2)	0,031	1214,8	EQ-BIO-61
Total:	0,506	20000,0	

17/11/2016

Fdo.: Carolina Hernandez
Laboratorio BIO-CIEMATFdo.: Inmaculada Sierra
Laboratorio BIO-CIEMAT



PT CRC 300 R7

Volumenes de relleno de radionucleidos BOMAB HE4

Co60	V (ml)	A (Bq)	Codigo de pipeta
Cabeza	0,016	616,2	EQ-B10-61
Cuello	0,004	158,5	EQ-B10-62
Tórax	0,076	2993,0	EQ-B10-61
Abdomen	0,044	1743,0	EQ-B10-61
Muslo (1)	0,026	1021,1	EQ-B10-61
Muslo (2)	0,026	1021,1	EQ-B10-61
Pierna (1)	0,016	616,2	EQ-B10-61
Pierna (2)	0,016	616,2	EQ-B10-61
Brazo (1)	0,015	607,4	EQ-B10-61
Brazo (2)	0,015	607,4	EQ-B10-61
Total:	0,252	10000,0	

Cs-134	V (ml)	A (Bq)	Codigo de pipeta
Cabeza	0,032	1232,4	EQ-B10-61
Cuello	0,008	316,9	EQ-B10-62
Tórax	0,155	5985,9	EQ-B10-75
Abdomen	0,090	3485,9	EQ-B10-61
Muslo (1)	0,053	2042,3	EQ-B10-61
Muslo (2)	0,053	2042,3	EQ-B10-61
Pierna (1)	0,032	1232,4	EQ-B10-61
Pierna (2)	0,032	1232,4	EQ-B10-61
Brazo (1)	0,031	1214,8	EQ-B10-61
Brazo (2)	0,031	1214,8	EQ-B10-61
Total:	0,517	20000,0	

17/11/2016

Fdo.: Carolina Hernandez
Laboratorio BIO-CIEMAT

Fdo.: Inmaculada Sierra
Laboratorio BIO-CIEMAT

	INFORME DE VERIFICACIÓN	Código:	CIEMAT/DR/DPI/36/2016
	Procedimiento de llenado de maniquí BOMAB y Vial de tiroides	Fecha:	30/11/2016
		Página:	13 de 13

Anexo 2: Incertidumbres de las pipetas



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número IV 160812
Number

Página 1 de 3
Page of

Mettler-Toledo S.A.E.

Laboratorio de Calibración

Sede Laboratorio
Avda. San Pablo, 28
28823 Coslada (Madrid)
Tel. 902 32 00 23
Laboratorio.Calibracion@mt.com

METTLER TOLEDO



OBJETO *Item* Pipeta monocanal y de volumen variable con cámara de aire. Volumen nominal 200 μ L.

MARCA *Mark* Eppendorf

MODELO *Model* Research 20-200 μ L

IDENTIFICACIÓN *Identification* 4907217

CÓDIGO INTERNO *Item Number* EQ-BIO-075

SOLICITANTE *Applicant* C.I.E.M.A.T (Servicio de Contratación)
Avda Complutense 22 (Ciudad Universitaria)
28040 Madrid

Fecha de Calibración *Date of Calibration* 21 de abril de 2016

Signatario Autorizado *Authorized Signatory* Firmado digitalmente por
Miguel Angel Fresno
Vargas - Jefe de Laboratorio
Fecha: 2016.04.21 11:18:31
+02'00'

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales. ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).
This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national or international standards. ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

Resultados de calibración

Pipeta Eppendorf Research 20 - 200 µL

Nº de serie 4907217

Puntas empleadas: Cliente

Informe inicial:

	Volumen 1	Volumen 2	Volumen3	
Volumen nominal	20	100	200	µL
Temperatura	21,6	21,6	21,6	°C
Numero de muestras	10	10	10	
Factor Z	1,00313	1,00313	1,00313	µL/mg
Volumen dispensado	19,86	99,85	200,18	µL

Resultados en valores absolutos

Error sistemático	-0,14	-0,15	0,18	µL
Error aleatorio	0,06	0,14	0,12	µL
Incertidumbre de calibración	0,17	0,31	0,44	µL
Incertidumbre de uso	0,31	0,46	0,62	µL

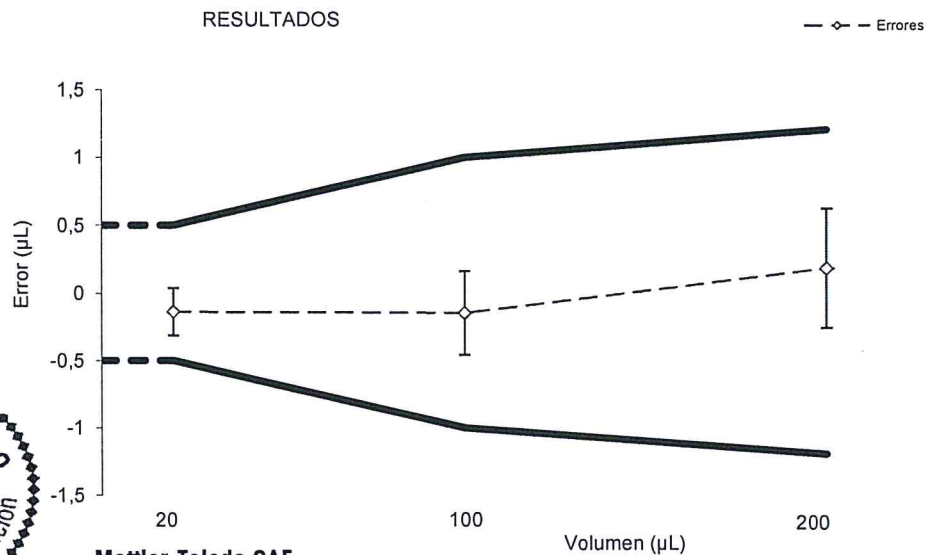
Resultados en valores relativos

Error sistemático	-0,69	-0,15	0,09	%
Coefficiente de variación	0,31	0,14	0,06	%
Incertidumbre de calibración	0,87	0,31	0,22	%
Incertidumbre de uso	1,6	0,46	0,31	%

Tolerancias según Fabricante

Exactitud	± 0,50	± 1,00	± 1,20	µL
	± 2,50	± 1,00	± 0,60	%
Cumple	SI	SI	SI	
Precisión	≤ 0,14	≤ 0,30	≤ 0,40	µL
	≤ 0,70	≤ 0,30	≤ 0,20	%
Cumple	SI	SI	SI	

RESULTADOS



Mettler-Toledo SAE

Miguel Hernández, 69-71

08908 L'Hospitalet del Llobregat (Barcelona)



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número IV 160806
Number

Página 1 de 3
Page of

Mettler-Toledo S.A.E.

Laboratorio de Calibración

Sede Laboratorio
Avda. San Pablo, 28
28823 Coslada (Madrid)
Tel. 902 32 00 23
Laboratorio.Calibracion@mt.com

METTLER TOLEDO



OBJETO Pipeta monocanal y de volumen variable con cámara de aire. Volumen nominal 100 µL.
Item

MARCA Eppendorf
Mark

MODELO Research 10-100 µL
Model

IDENTIFICACIÓN 118533
Identification

CÓDIGO INTERNO EQ-BIO-061
Item Number

SOLICITANTE C.I.E.M.A.T (Servicio de Contratación)
Applicant Avda Complutense 22 (Ciudad Universitaria)
28040 Madrid

Fecha de Calibración 20 de abril de 2016
Date of Calibration

Signatario Autorizado Firmado digitalmente por Miguel Angel Fresno Vargas
Authorized Signatory - Jefe de Laboratorio
Fecha: 2016.04.21 11:03:02
+02'00'

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales. ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).
This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national or international standards. ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

Resultados de calibración

Pipeta Eppendorf Research 10 - 100 µL

Nº de serie 118533

Puntas empleadas: Cliente

Informe inicial:

Falta protector de plástico de micrómetro.

	Volumen 1	Volumen 2	Volumen3	
Volumen nominal	10	50	100	µL
Temperatura	21,2	21,2	21,2	°C
Numero de muestras	10	10	10	
Factor Z	1,00303	1,00303	1,00303	µL/mg
Volumen dispensado	10,20	49,60	99,46	µL

Resultados en valores absolutos

Error sistemático	0,20	-0,40	-0,54	µL
Error aleatorio	0,04	0,06	0,06	µL
Incertidumbre de calibración	0,10	0,15	0,22	µL
Incertidumbre de uso	0,30	0,55	0,76	µL

Resultados en valores relativos

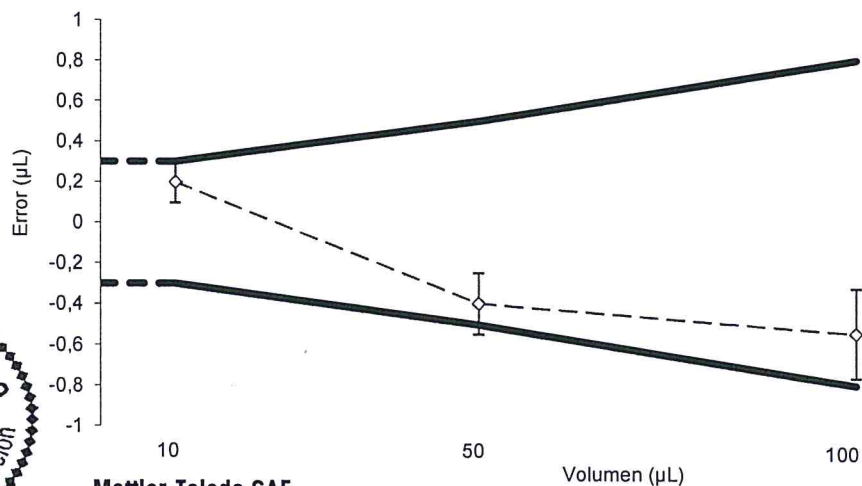
Error sistemático	1,98	-0,79	-0,54	%
Coefficiente de variación	0,36	0,12	0,06	%
Incertidumbre de calibración	1,0	0,30	0,22	%
Incertidumbre de uso	3,0	1,1	0,76	%

Tolerancias según Fabricante

Exactitud	± 0,30	± 0,50	± 0,80	µL
	± 3,00	± 1,00	± 0,80	%
Cumple	SI	SI	SI	
Precisión	≤ 0,10	≤ 0,15	≤ 0,20	µL
	≤ 1,00	≤ 0,30	≤ 0,20	%
Cumple	SI	SI	SI	

RESULTADOS

—◇— Errores



Mettler-Toledo SAE

Miguel Hernández, 69-71

08908 L'Hospitalet del Llobregat (Barcelona)



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número IV 160805
Number

Página 1 de 3
Page of

Mettler-Toledo S.A.E.

Laboratorio de Calibración

Sede Laboratorio

Avda. San Pablo, 28

28823 Coslada (Madrid)

Tel. 902 32 00 23

Laboratorio.Calibracion@mt.com

METTLER TOLEDO



OBJETO Pipeta monocanal y de volumen variable con cámara de aire. Volumen
Item nominal 10 µL.

MARCA Eppendorf
Mark

MODELO Research 0,5-10 µL
Model

IDENTIFICACIÓN 206649
Identification

CÓDIGO INTERNO EQ-BIO-062
Item Number

SOLICITANTE C.I.E.M.A.T (Servicio de Contratación)
Applicant Avda Complutense 22 (Ciudad Universitaria)
28040 Madrid

Fecha de Calibración 20 de abril de 2016
Date of Calibration

Signatario Autorizado Firmado digitalmente por
Autorized Signatory Miguel Angel Fresno Vargas
- Jefe de Laboratorio
Fecha: 2016.04.21 11:03:20
+02'00'

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.

ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national or international standards.

ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

Resultados de calibración

Pipeta Eppendorf Research 1 - 10 µL

Nº de serie 206649

Puntas empleadas: Cliente

Informe inicial:

	Volumen 1	Volumen 2	Volumen3	
Volumen nominal	1	5	10	µL
Temperatura	20,2	20,2	20,2	°C
Numero de muestras	10	10	10	
Factor Z	1,002814	1,002814	1,002814	µL/mg
Volumen dispensado	1,013	5,011	10,073	µL

Resultados en valores absolutos

Error sistemático	0,013	0,011	0,073	µL
Error aleatorio	0,017	0,027	0,020	µL
Incertidumbre de calibración	0,034	0,054	0,070	µL
Incertidumbre de uso	0,047	0,065	0,14	µL

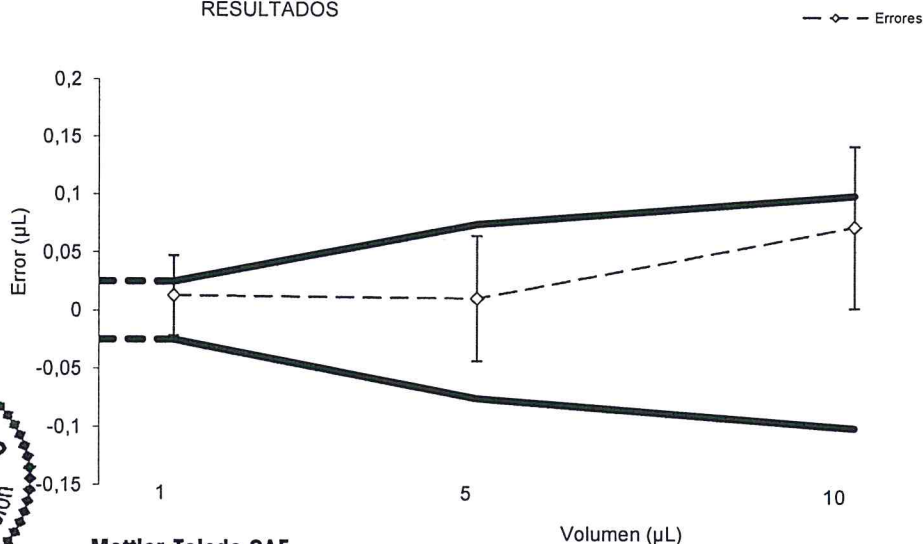
Resultados en valores relativos

Error sistemático	1,28	0,22	0,73	%
Coefficiente de variación	1,68	0,53	0,19	%
Incertidumbre de calibración	3,4	1,1	0,70	%
Incertidumbre de uso	4,7	1,3	1,4	%

Tolerancias según Fabricante

Exactitud	± 0,03	± 0,08	± 0,10	µL
	± 2,50	± 1,50	± 1,00	%
Cumple	SI	SI	SI	
Precisión	≤ 0,02	≤ 0,04	≤ 0,04	µL
	≤ 1,80	≤ 0,80	≤ 0,40	%
Cumple	SI	SI	SI	

RESULTADOS



Mettler-Toledo SAE

Miguel Hernández, 69-71

08908 L'Hospitalet del Llobregat (Barcelona)



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número IV 160814
Number

Página 1 de 3
Page of

Mettler-Toledo S.A.E.

Laboratorio de Calibración

Sede Laboratorio

Avda. San Pablo, 28

28823 Coslada (Madrid)

Tel. 902 32 00 23

Laboratorio.Calibracion@mt.com

METTLER TOLEDO



OBJETO Pipeta monocal y de volumen variable con cámara de aire. Volumen
Item nominal 1000 µL.

MARCA Eppendorf
Mark

MODELO Research 100-1000 µL
Model

IDENTIFICACIÓN 108591
Identification

CÓDIGO INTERNO EQ-BIO-057
Item Number

SOLICITANTE C.I.E.M.A.T (Servicio de Contratación)
Applicant Avda Complutense 22 (Ciudad Universitaria)
28040 Madrid

Fecha de Calibración 21 de abril de 2016
Date of Calibration

Signatario Autorizado Firmado digitalmente por
Authorized Signatory Miguel Angel Fresno Vargas
- Jefe de Laboratorio
Fecha: 2016.04.21 11:18:59
+02'00'

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.

ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national or international standards.

ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

Resultados de calibración

Pipeta Eppendorf Research 100 - 1000 µL

Nº de serie 108591

Puntas empleadas: Cliente

Informe inicial:

Falta plástico protector del micrómetro.

	Volumen 1	Volumen 2	Volumen3	
Volumen nominal	100	500	1000	µL
Temperatura	21,9	21,9	21,9	°C
Numero de muestras	10	10	10	
Factor Z	1,0032	1,0032	1,0032	µL/mg
Volumen dispensado	100,18	497,5	997,0	µL

Resultados en valores absolutos

Error sistemático	0,18	-2,5	-3,0	µL
Error aleatorio	0,18	0,5	0,4	µL
Incertidumbre de calibración	0,69	1,1	2,2	µL
Incertidumbre de uso	0,87	3,6	5,2	µL

Resultados en valores relativos

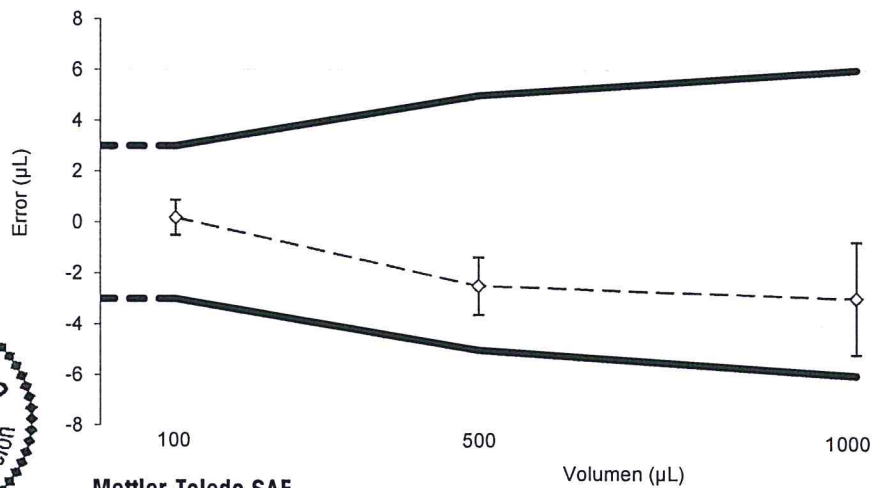
Error sistemático	0,18	-0,50	-0,30	%
Coefficiente de variación	0,18	0,09	0,04	%
Incertidumbre de calibración	0,69	0,22	0,22	%
Incertidumbre de uso	0,87	0,72	0,52	%

Tolerancias según Fabricante

Exactitud	± 3,00	± 5,00	± 6,00	µL
	± 3,00	± 1,00	± 0,60	%
Cumple	SI	SI	SI	
Precisión	≤ 0,60	≤ 1,00	≤ 2,00	µL
	≤ 0,60	≤ 0,20	≤ 0,20	%
Cumple	SI	SI	SI	

RESULTADOS

— ◊ — Errores



Mettler-Toledo SAE

Miguel Hernández, 69-71

08908 L'Hospitalet del Llobregat (Barcelona)